



Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Instytut Nauk Ogrodniczych

mgr inż. Maria Luiza Małachowska

**Wpływ przed- i pozbiorczego zastosowania
1-MCP oraz warunków ULO i DKA
na właściwości przechowalnicze i jakość
jabłek odmiany ‘Gala Schniga’
w długotrwałym obrocie towarowym**

Effects of pre- and postharvest application of 1-MCP and ULO
and DCA storage conditions on the storage properties and quality
of ‘Gala Schniga’ apples during long-term commercial
distribution

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem
Prof. dr hab., dr h.c. Kazimierza Tomali
Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa,
Instytut Nauk Ogrodniczych, SGGW

Warszawa, 2026

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że rozprawa doktorska autorstwa Marii Luizy Małachowskiej została przygotowana pod moim kierunkiem na podstawie badań realizowanych w ramach kształcenia w Szkole Doktorskiej SGGW i stwierdzam, że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

26.02.2026 r.
Data

Kazimierz Tomale
Czytelny podpis promotora

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadoma odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przeze mnie samodzielnie na podstawie badań realizowanych w ramach kształcenia w Szkole Doktorskiej SGGW i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

26.02.2026 r.
Data

Maria Małachowska
Czytelny podpis autora rozprawy

Podziękowania

Panu

Prof. dr hab., dr h.c. Kazimierzowi Tomali

składam najserdeczniejsze podziękowania za opiekę naukową, cierpliwość i życzliwość okazywaną mi na każdym etapie powstawania niniejszej rozprawy doktorskiej.

Dziękuję za inspirację, która nie ograniczała się jedynie do wskazywania kierunków badawczych, lecz uczyła odwagi w formułowaniu pytań i konsekwencji w poszukiwaniu odpowiedzi.

Pańska wiedza, doświadczenie i niezwykła intuicja naukowa były dla mnie nie tylko wsparciem merytorycznym, lecz także punktem odniesienia w kształtowaniu własnej postawy badawczej.

Jestem szczególnie wdzięczna za atmosferę zaufania i otwartości, która pozwalała mi rozwijać się samodzielnie, a jednocześnie czuć stałe wsparcie Mistrza. Wspólne rozmowy, dyskusje i konstruktywna krytyka były dla mnie bezcenną lekcją rzetelności, pokory wobec danych oraz odpowiedzialności za słowo.

Możliwość pracy pod Pańskim kierunkiem traktuję jako zaszczyt i jedno z najważniejszych doświadczeń w mojej dotychczasowej drodze naukowej.

Ponadto składam serdeczne podziękowania

**Koleżankom i Kolegom z Katedry Sadownictwa i Ekonomiki
Ogrodnictwa**

za życzliwość, wsparcie oraz codzienną gotowość do pomocy na różnych etapach realizacji pracy doktorskiej.

Dziękuję za inspirujące rozmowy, wymianę doświadczeń i atmosferę współpracy, która sprzyjała zarówno pracy naukowej, jak i wzajemnej motywacji.

Państwa otwartość i zaangażowanie były dla mnie cennym wsparciem w trakcie całego procesu badawczego.

Z wyrazami głębokiego szacunku i wdzięczności,

Mania Kulachowska

Pracę dedykuję
*Mamie, Tacie i Braciom –
za bezwarunkową miłość, cierpliwość oraz wiarę, która towarzyszyła
mi na każdym etapie tej drogi.
Wasze wsparcie było fundamentem, na którym mogłam budować swoje
marzenia.*

Dziękuję

Mania Katalachowska

Spis treści	
Streszczenie.....	11
Wykaz skrótów	17
1. Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej.....	19
2. Wstęp i przegląd literatury	20
2.1. Wstęp.....	20
2.2. Oczekiwania konsumentów	22
2.3. Czynniki przedzbiórcze: wpływ warunków atmosferycznych i terminu zbioru na potencjał przechowalniczy jabłek.....	24
2.4. Rola etylenu – mechanizm spadku jakości	26
2.5. 1-MCP – ograniczanie odpowiedzi na etylen i znaczenie terminu aplikacji	29
2.6. Warunki przechowywania – KA, ULO i DKA	31
2.7. Transport i długość symulowanego obrotu detalicznego – końcowy etap łańcucha logistycznego jako źródło pogorszenia jakości owoców	34
2.8. Luka badawcza.....	39
3. Cel, zakres badań i hipotezy badawcze	40
Część A. Czynniki modyfikujące jakość pozbiórczą jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w warunkach długotrwałego przechowywania	41
4.A. Materiały i metody	41
4.A.1. Materiał roślinny i układ doświadczenia.....	41
4.A.2. Oznaczone parametry jakości owoców	43
4.A.3. Analiza statystyczna	46
4.A.3.1. Publikacja I (PI).....	46
4.A.3.2. Publikacja II (PII).....	46
5.A. Najważniejsze wyniki.....	46
6.A. Dyskusja	50
Część B. Kształtowanie jakości jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w długotrwałym obrocie towarowym w zależności od długości przechowywania i czasu transportu	54
4.B. Materiały i metody	54
4.B.1. Materiał roślinny i układ doświadczenia.....	54
4.B.2. Oznaczone parametry jakości owoców.....	55
4.B.3. Zmienne niezależne i struktura układu czynnikowego	56
4.B.4. Kodowanie zmiennych do analiz statystycznych	57
4.B.5.1. Publikacja III (2021/2022)	59
4.B.5.2. Część IV – wyniki nieopublikowane (2022/2023 i 2023/2024).....	60
5.B. Wyniki.....	61
Najważniejsze wyniki – Publikacja III (PIII).....	61

Wyniki z części B (nieopublikowane)	66
5.B.1. Warunki atmosferyczne w okresach wegetacyjnych w latach 2022-2023	66
5.B.2. Jędrność miąższu (F)	69
5.B.3. Kwasowość miareczkowa (TA)	72
5.B.4. Zawartość ekstraktu (SSC)	74
5.B.5. SSC/TA	77
5.B.6. Kwas 1-aminocyklopropano-1-karboksylowy (ACC)	79
6.B. Dyskusja	82
7. Wnioski	88
7.1. Zalecenia praktyczne	89
8. Weryfikacja hipotez	90
Dorobek doktorantki	101
Kopie publikacji składających się na rozprawę doktorską wraz z oświadczeniami współautorów	106

Streszczenie

W niniejszej pracy podjęto próbę oceny czynników wpływających na jakość jabłek odmiany 'Gala Schniga' po zbiorze, ze szczególnym uwzględnieniem okresu długotrwałego obrotu handlowego. Analizie poddano przede wszystkim warunki długiego przechowywania, transport dalekodystansowy oraz symulowany, wydłużony obrót detaliczny w podwyższonej temperaturze. Punktem wyjścia badań był problem utrzymania stabilnej jakości owoców przeznaczonych na eksport, gdzie o powodzeniu handlowym w największym stopniu decydują jędrność (F) oraz kwasowość miareczkowa (TA). Wykazano, że zawartość ekstraktu (SSC) ma w tym kontekście znaczenie bardziej zmienne i w mniejszym stopniu związane z jakością owoców. Powszechnie uznaje się, że jednym z kluczowych czynników odpowiedzialnych za pogarszanie jakości jabłek jest etylen. W związku z tym badania skoncentrowano na ograniczeniu jego działania poprzez zastosowanie 1-MCP w powiązaniu z warunkami przechowywania charakteryzującymi się bardzo niską zawartością tlenu.

W centrum zainteresowania znalazła się ocena wpływu terminu zbioru – porównywano owoce zebrane w terminie optymalnym z owocami zebranymi z około 14-dniowym opóźnieniem. Dodatkowo przeanalizowano wpływ terminu zastosowania 1-MCP: przedzbiorniczo (preparat Harvista™), pozbiorniczo (SmartFresh™) oraz w wariacie łączonym – zarówno przed, jak i po zbiorze. Owoce przechowywano w warunkach ULO (1,2% CO₂ i 1,2% O₂) oraz w warunkach określanych jako „quasi-DKA” (0,6% CO₂ i 0,6% O₂, bez dynamicznej regulacji stężenia tlenu). Jakość oceniano na podstawie takich parametrów, jak jędrność (F), kwasowość miareczkowa (TA), zawartość ekstraktu (SSC), stosunek SSC/TA oraz zawartość ACC, traktowaną jako biochemiczny wskaźnik potencjału produkcji etylenu przez owoce.

Doświadczenie przeprowadzono na jabłkach pochodzących z sadu doświadczalnego SGGW w Warszawie, w trzech kolejnych sezonach przechowalniczych. Zastosowano wieloczynnikowy układ doświadczalny, w którym analizowanymi zmiennymi były: termin zbioru, termin aplikacji 1-MCP, warunki przechowywania (ULO vs. quasi-DKA), długość przechowywania (od 5 do 9 miesięcy) oraz warunki symulowanego obrotu hurtowo-detalicznego (0 lub 7 dni w temperaturze 20°C, a w modelu eksportowym – do 14 dni w temperaturze 25°C). Analizę statystyczną oparto na metodach porównawczych (ANOVA, testy nieparametryczne) oraz modelach wieloczynnikowych, w tym regresji krokowej. Siłę oddziaływania poszczególnych czynników oceniano na podstawie cząstkowego współczynnika eta kwadrat (η^2).

Uzyskane wyniki wskazały, że jakość jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w dużej mierze zależy od decyzji podejmowanych po zbiorze oraz od warunków panujących w końcowym etapie łańcucha logistycznego, czyli w okresie i przy temperaturach po wyjęciu z chłodni. Same warunki przechowywania czy parametry transportu wydają się mieć mniejsze znaczenie w porównaniu z tymi czynnikami. Najbardziej efektywnym sposobem stabilizacji jakości okazało się pozbiorcze stosowanie 1-MCP (SmartFresh™). Zabieg ten konsekwentnie ograniczał procesy zależne od działania etylenu, przyczyniał się do utrzymania wysokiej jędrności i wyższej kwasowości miareczkowej, a także spowalniał wzrost zawartości ACC. Natomiast zastosowanie 1-MCP przed zbiorem (Harvista™) dawało efekt zauważalny, lecz znacznie słabszy i wyraźnie uzależniony od terminu zbioru jabłek. Szczególnie przy zbiorze opóźnionym skuteczność tego zabiegu często okazywała się niewystarczająca, zwłaszcza gdy owoce były poddawane długotrwałemu łańcuchowi logistycznemu, obejmującemu transport oraz symulowany obrót detaliczny.

Termin zbioru okazał się więc jednym z istotniejszych czynników ryzyka – zbiór opóźniony obniżał jędrność owoców i przyspieszał spadek ich jakości podczas dalszego transportu oraz obrotu w podwyższonej temperaturze. Praktyczna granica jakościowa, wynosząca około 55 N, była utrzymywana przede wszystkim przy stosowaniu SmartFresh™, zarówno samodzielnie, jak i w połączeniu z preparatem Harvista™. W warunkach najbardziej obciążających – obejmujących długi transport i obrót detaliczny w temperaturze 25°C – pewniejszą ochronę zapewniała kombinacja Harvista™ + SmartFresh™, zwłaszcza w przypadku owoców po późniejszym zbiorze lub po długim okresie przechowywania.

Różnice między technologiami przechowywania ULO i quasi-DKA okazały się w większości analiz mniejsze niż wpływ decyzji dotyczących terminu zastosowania 1-MCP oraz terminu zbioru jabłek. W niektórych przypadkach rozbieżności między ocenianymi warunkami przechowywania były wręcz minimalne. Można więc stwierdzić, że przy skutecznym ograniczeniu działania etylenu, zwłaszcza poprzez pozbiorcze stosowanie 1-MCP, znaczenie głębszych reżimów niskotlenowych maleje. Znacznie ważniejszy staje się czas ekspozycji owoców po wyjęciu z chłodni na warunki otoczenia. Zmienność zawartości SSC była stosunkowo niewielka i w dużej mierze zależała od interakcji poszczególnych czynników. Stwierdzono, że 1-MCP zastosowany przed zbiorem (Harvista™) i po zbiorze (SmartFresh™) wywoływał przeciwstawne efekty na zawartość SSC – pierwszy zwykle obniżał jego wartość, natomiast drugi sprzyjał jej

wzrostowi. W przypadku wskaźnika SSC/TA jego wzrost wynikał głównie ze spadku TA w miarę upływu czasu; jednocześnie 1-MCP, szczególnie w zastosowaniu pozbiorczym, ograniczał ten wzrost.

Należy również zaznaczyć, że pewien wpływ mogły mieć warunki atmosferyczne przed zbiorem, oddziałujące przede wszystkim na jędrność owoców. Mimo to ich znaczenie pozostawało zazwyczaj mniejsze niż wpływ terminu zbioru czy terminu zastosowania 1-MCP. W podsumowaniu można stwierdzić, że w eksporcie jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ nie da się sprowadzić jakości do działania pojedynczego czynnika. Największe znaczenie mają decyzje dotyczące terminu zbioru oraz pozbiorczego zastosowania 1-MCP, które stanowią podstawowe narzędzia kontrolujące utratę jędrności i kwasowości owoców. W bardziej wymagających warunkach – przy długim transporcie, wyższej temperaturze w miejscu docelowym czy wydłużonym okresie obrotu – najskuteczniejszą strategią okazuje się podejście łączone, obejmujące zastosowanie zarówno Harvista™, jak i SmartFresh™.

Słowa kluczowe: jabłka, jakość, 1-metylocyklopropan (1-MCP), ULO, DKA, etylen, jędrność, kwasowość.

Abstract

This study aimed to evaluate the factors affecting the postharvest quality of the apple cultivar 'Gala Schniga', with particular emphasis on prolonged commercial distribution. The analysis focused primarily on long-term storage conditions, long-distance transport, and simulated extended retail shelf-life at elevated temperatures. The research began with the challenge of maintaining stable fruit quality for export markets, where commercial success is largely determined by flesh firmness (F) and titratable acidity (TA). Soluble solids content (SSC) was shown to be more variable in this context and less directly associated with overall fruit quality. Since ethylene is widely recognized as a key factor in apple quality deterioration, the study focused on mitigating its effects by applying 1-methylcyclopropene (1-MCP) in combination with storage conditions characterized by very low oxygen levels.

Particular attention was paid to the effect of harvest date, comparing fruit harvested at the optimal maturity stage with fruit harvested approximately 14 days later. In addition, the timing of 1-MCP application was analysed: preharvest (Harvista™), postharvest (SmartFresh™), and a combined strategy involving both pre- and postharvest treatments. Fruit was stored under ULO conditions (1.2% CO₂ and 1.2% O₂) and under so-called quasi-DCA conditions (0.6% CO₂ and 0.6% O₂, without dynamic oxygen regulation). Quality assessment included flesh firmness (F), titratable acidity (TA), soluble solids content (SSC), the SSC/TA ratio, and ACC concentration, considered a biochemical indicator of the fruit's ethylene production potential.

The experiment was conducted on apples originating from the experimental orchard of the Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS) over three consecutive storage seasons. A multifactorial experimental design was applied, including the following variables: harvest date, timing of 1-MCP application, storage conditions (ULO vs. quasi-DCA), storage duration (5-9 months), and simulated wholesale-retail conditions (0 or 7 days at a temperature of 20 °C, and in the export model up to 14 days at a temperature of 25 °C). Statistical analysis was based on comparative methods (ANOVA and nonparametric tests) and on multifactorial models, including stepwise regression. The strength of individual factors was evaluated using partial eta squared (η^2).

The results indicated that the quality of 'Gala Schniga' apples largely depended on postharvest decisions and on conditions prevailing at the final stage of the logistic chain, i.e., the period and temperatures after removal from cold storage. Storage

atmosphere and transport parameters alone appeared less influential compared with these factors. The most effective strategy for quality stabilization was postharvest application of 1-MCP (SmartFresh™). This treatment consistently limited ethylene-dependent processes, maintained high firmness and higher titratable acidity, and slowed the increase in ACC content. In contrast, preharvest 1-MCP (Harvista™) produced a noticeable but significantly weaker effect, clearly dependent on harvest timing. Especially under delayed harvest, its effectiveness was often insufficient when fruit was subjected to an extended logistic chain, including transport and simulated retail conditions.

Harvest date proved to be a significant risk factor. Delayed harvest reduced fruit firmness and accelerated quality deterioration during subsequent transport and high-temperature shelf-life. The practical quality threshold of approximately 55 N was maintained primarily when SmartFresh™ was applied, either alone or in combination with Harvista™. Under the most demanding conditions – long transport and retail shelf-life at 25 °C – the Harvista™ + SmartFresh™ combination provided more reliable protection, particularly for late-harvested fruit or fruit subjected to prolonged storage.

Differences between ULO and quasi-DCA storage technologies were, in most analyses, smaller than the effects associated with harvest timing and 1-MCP application date. In some cases, discrepancies between storage conditions were minimal. Thus, when ethylene action was effectively suppressed, especially through postharvest 1-MCP application, the importance of deeper low-oxygen regimes diminished. Instead, the duration of fruit exposure to ambient conditions after removal from storage became more critical. Variability in SSC was relatively limited and largely dependent on interactions among factors. Notably, preharvest 1-MCP (Harvista™) and postharvest 1-MCP (SmartFresh™) exerted opposite effects on SSC: Harvista™ generally reduced SSC, whereas SmartFresh™ increased it. The increase in the SSC/TA ratio was primarily associated with the progressive decline in TA over time, whereas 1-MCP, particularly when applied postharvest, attenuated this increase.

Weather conditions before harvest may also have influenced fruit firmness; however, their effect was generally smaller than that of harvest date and 1-MCP application timing. In summary, the quality of ‘Gala Schniga’ apples intended for export cannot be attributed to a single factor. Decisions regarding harvest timing and postharvest 1-MCP application constitute the primary tools for controlling firmness and acidity loss. Under more demanding conditions – such as long-distance transport, higher destination

temperatures, or extended distribution periods – a combined strategy combining both Harvista™ and SmartFresh™ appears to be the most effective approach.

Keywords: apples, quality, 1-methylcyclopropene (1-MCP), ULO, DCA, ethylene, firmness, titratable acidity.

Wykaz skrótów

- 1-MCP – 1-metylocyklopropen
ACC – kwas 1-aminocyklopropano-1-karboksylowy (prekursor biosyntezy etylenu)
ANN – sztuczna sieć neuronów
ANOVA – analiza wariancji
AP2-like – rodzina czynników transkrypcyjnych związanych z odpowiedzią na etylen
BBX – rodzina czynników transkrypcyjnych typu B-box
CA (KA) – atmosfera kontrolowana
CF – fluorescencja chlorofilu
CIE Lab (L*, a*, b*) – przestrzeń barw CIE Lab (parametry jasności i składowych barwy)
CO₂ – dwutlenek węgla
DH – opóźniony termin zbioru
DKA – dynamiczna kontrolowana atmosfera
DKA-CD – dynamiczna kontrolowana atmosfera – metoda oparta na detekcji produkcji CO₂
DKA-CF – dynamiczna kontrolowana atmosfera – metoda oparta na fluorescencji chlorofilu
DKA-RQ – dynamiczna kontrolowana atmosfera – metoda oparta na ilorazie oddechowym
ERF – czynnik odpowiedzi na etylen
F – jędrność miąższu (wyrażona w niutonach – N)
'Gala', 'Gala Schniga' – w niniejszej pracy określenia te odnoszą się do odmiany handlowej 'Gala Schniga'® SchniCo Red(s)
IS – Indeks Streifa
LOL – dolna granica tlenowa
MAP – opakowanie z atmosferą modyfikowaną
MdACO1 – gen oksydazy ACC u jabłoni (*Malus domestica*)
MdACS1 – gen syntazy ACC u jabłoni (*Malus domestica*)
MdERS1/2 – geny receptorów etylenu u jabłoni (Ethylene Response Sensor 1/2)
MdETRI/2 – geny receptorów etylenu u jabłoni (Ethylene Receptor 1/2)
NAC – rodzina czynników transkrypcyjnych związanych z regulacją dojrzewania
O₂ – tlen
OHD – optymalny termin zbioru
PI – Publikacja I
PII – Publikacja II
PIII – Publikacja III
PIV – Publikacja IV (wyniki nieopublikowane)
PLS – metoda cząstkowych najmniejszych kwadratów
quasi-DKA – warunki zbliżone do DKA, bez dynamicznego wyznaczania dolnej granicy tlenowej (w pracy: 0,6% CO₂ i 0,6% O₂)
RQ – iloraz oddechowy
SD – odchylenie standardowe
SE – błąd standardowy
shelf-life – długość symulowanego obrotu detalicznego
SSC – zawartość ekstraktu (°Brix)

SSC/TA – stosunek zawartości ekstraktu do kwasowości miareczkowej (wskaźnik równowagi smakowej)

TA – kwasowość miareczkowa

ULO – atmosfera o ultra niskiej zawartości tlenu (w pracy: 1,2% CO₂ i 1,2% O₂)

WRKY – rodzina czynników transkrypcyjnych związanych z odpowiedzią na stres i etylen

XTH – ksylanotransglukozylazy (enzymy modyfikujące ścianę komórkową)

η^2 – eta kwadrat – miara wielkości efektu w analizie wariancji

1. Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej

Przedłożona rozprawa doktorska ma formę zbioru trzech powiązanych ze sobą tematycznie opublikowanych artykułów naukowych oraz jednego nieopublikowanego artykułu.

Część A. Czynniki modyfikujące jakość pozbiorną jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w warunkach długotrwałego przechowywania

PI. Malachowska M., Tomala K. Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s) apples during long-term storage. *Agriculture*, 2022, 12, 2073. DOI: 10.3390/agriculture12122073. (IF₂₀₂₂: 3,6; MEiN: 100)

PII. Malachowska, M., Tomala, K. Determinants of postharvest quality in ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s) apples: The role of harvest date, storage duration, and 1-MCP application. *Agriculture*, 2025; 15, 2363. DOI: 10.3390/agriculture15222363. (IF₂₀₂₄: 3,6; MEiN: 100)

Część B. Kształtowanie jakości jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w długotrwałym obrocie towarowym w zależności od długości sezonu przechowalniczego i czasu transportu

PIII. Malachowska, M., Tomala, K. Apple quality during shelf-life after long-term storage and simulated transport. *Agriculture*, 2023; 13(11), 2045. DOI: 10.3390/agriculture13112045. (IF₂₀₂₃: 3,3; MEiN: 140)

PIV. Wyniki nieopublikowane (szczegółowo opisane w niniejszej pracy – zamiennie używane jako publikacja IV).

Sumaryczny IF publikacji wynosi – 10,5.

Liczba punktów ministerialnych wynosi – 340 pkt.

Punktacja wskazanych publikacji została określona na podstawie wykazu czasopism naukowych oraz recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych, zgodnie z komunikatami Ministerstwa Nauki z 17 lipca 2023 r. oraz 5 stycznia 2024 r.

2. Wstęp i przegląd literatury

2.1. Wstęp

Jabłka należą do najważniejszych gatunków owoców klimatu umiarkowanego i stanowią istotny segment rynku owoców deserowych. Znaczna część ich produkcji przeznaczana jest do długotrwałego przechowywania oraz eksportu, dlatego utrzymanie wysokiej jakości po zbiorach staje się jednym z kluczowych wyzwań w całym łańcuchu dostaw (Johnston i in., 2002; FAO, 2023). W Polsce problem ten ma szczególne znaczenie ze względu na dużą skalę produkcji i pozycję kraju jako eksportera. Przy rosnącej podaży i spadającym spożyciu krajowym, stabilność jakości owoców przekłada się bezpośrednio na wyniki ekonomiczne (Internet; WAPA, 2021).

Wymagania konsumentów oraz rynków importowych sprawiają, że celem krajowej produkcji jabłek nie jest jedynie uzyskanie wysokiej jakości owoców w momencie zbioru, lecz przede wszystkim jej utrzymanie w długim łańcuchu przechowalniczo-dystrybucyjnym, obejmującym czas przechowywania, transport oraz symulowany okres obrotu detalicznego (Małachowska i Tomala, 2022; Hasan i in., 2024). O decyzji zakupowej często przesądzają cechy zewnętrzne, w tym atrakcyjność rumieńca (Wong i in., 2020), natomiast o akceptacji i powtórny zakupie w dużej mierze decyduje jakość, zwłaszcza jędrność miąższu kojarzona ze świeżością i chrupkością (Bejaci i in., 2021; Mou i in., 2025). Wraz ze spadkiem jędrności narasta nietolerowane przez konsumentów odczucie mączystości (Shukla i Jharkharia, 2013; O'Neil i in., 2015), dlatego w przypadku odmian twardych, do których należy 'Gala', szczególnie istotne jest utrzymanie jędrności jabłek powyżej 55 N (Hochm i in., 2003a).

Jakość pozbiorcza jabłek jest rezultatem oddziaływania zarówno czynników przedzbiorczych, jak i pozbiorczych. Do kluczowych determinant przedzbiorczych należą przebieg warunków atmosferycznych w sezonie wegetacyjnym, dostępność wody oraz termin i stopień dojrzałości zbiorczej (Musacchi i Serra, 2018; Tao i in., 2022; Zhang i in., 2022a). Czynniki te wpływają na tempo akumulacji cukrów, metabolizm kwasów organicznych oraz syntezę prekursorów etylenu, a tym samym kształtują potencjał przechowalniczy jabłek już w czasie zbioru (Kwon i in., 2024). W praktyce oznacza to, że identyczne strategie przechowywania mogą przynosić odmienne rezultaty w zależności od roku i lokalizacji uprawy, nawet dla tej samej odmiany, przy czym wybór terminu zbioru stanowi jeden z najważniejszych czynników determinujących dalszy przebieg zmian jakościowych.

Po zbiorze kluczową rolę odgrywa etylen, pełniący funkcję głównego regulatora dojrzewania owoców klimakterycznych (Pirello i in., 2015; Thongkum i in., 2018; Li i in., 2020; Wang i in., 2023; Ramón i in., 2024). Wzrost syntezy etylenu inicjuje skoordynowane zmiany fizjologiczne i molekularne, obejmujące m.in. modyfikację ściany komórkowej, utratę spójności tkanek oraz obniżenie jędrności owoców, co w efekcie prowadzi do kształtowania się niepożądanego tekstury, w tym zjawiska mączystości miąższu (Wei i in., 2010). W związku z tym jednym z zasadniczych kierunków w technologii pozbiorczej jest kontrola etylenu, realizowana zarówno poprzez optymalizację warunków przechowywania ograniczających intensywność jego produkcji, jak i poprzez stosowanie środków hamujących działanie etylenu w tkankach owoców, co pozwala spowolnić procesy dojrzewania i utrzymać wysoką jakość pozbiorcza.

Kluczowym narzędziem ograniczania reakcji owoców na etylen jest 1-metylocyklopropan (1-MCP), stosowany w celu spowolnienia procesów dojrzewania oraz utrzymania jędrności i kwasowości owoców w trakcie długotrwałego przechowywania i dystrybucji (Mattheis, 2008; Zhang i in., 2022b; Kwon i in., 2024). Skuteczność 1-MCP zależy jednak od odmiany, stopnia dojrzałości zbiorczej oraz warunków przechowywania, przy czym szczególne znaczenie praktyczne ma termin aplikacji. Zarówno wariant przedzbiorczy (np. Harvista™), umożliwiający stabilizację parametrów owoców i opóźnienie zbioru, jak i wariant pozbiorczy, w którym opóźnienie zabiegu może osłabiać efekt hamowania produkcji etylenu i skracać czas działania 1-MCP, warunkują ostateczną skuteczność zabiegu (Watkins i Nock, 2005; Tatsuki i in., 2007; Huber i in., 2010; Gwanpua i in., 2017a; Gwanpua i in., 2017b).

Drugim sposobem utrzymania jakości owoców są warunki przechowywania w atmosferach kontrolowanych – klasycznej KA (CA), nisko tlenowej UIO oraz w dynamicznym systemie DKA (DCA). Obniżenie stężenia O₂ oraz odpowiednie kształtowanie zawartości CO₂ spowalniają procesy metaboliczne i starzenie owoców, wspierając długotrwałe utrzymanie jędrności. Efektywność poszczególnych technologii oraz ich współdziałanie z 1-MCP zależą od stopnia redukcji tlenu, precyzji kontroli dolnej granicy tlenowej, a także od odmiany i profilu ryzyka wystąpienia zaburzeń fizjologicznych. W wielu badaniach warunki UIO i DKA zapewniały stabilniejszą jakość owoców niż klasyczna KA/CA, podczas gdy 1-MCP pozostaje szczególnie istotny tam, gdzie infrastruktura do przechowywania w warunkach niskotlenowych jest ograniczona

lub gdy część łańcucha (np. transport) odbywa się w atmosferze normalnej (Watkins i in., 2000; Thewes i in., 2015; Mditshwa i in., 2018; Tomala i in., 2021).

Coraz częściej podkreśla się, że o jakości jabłek ocenianej przez konsumenta decyduje nie tylko stan owoców po zakończeniu długiego przechowywania, ale także ich zachowanie w końcowych etapach obrotu – podczas transportu oraz długości symulowanego okresu obrotu detalicznego. Po wyjęciu z chłodni owoce stają się bardziej wrażliwe na wahania temperatury, niedobór wilgotności oraz uszkodzenia mechaniczne, co może prowadzić do dodatkowego spadku jędrności, zawartości kwasów (TA), pogorszenia wyglądu i ubytku masy. W warunkach obrotu towarowego kluczowe znaczenie ma właściwy dobór terminu zastosowania 1-MCP, utrzymywanie optymalnej temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz stosowanie opakowań ograniczających intensywność oddychania i transpiracji owoców (np. worków MAP). Działania te mogą w istotnym stopniu ograniczyć pogorszenie jakości, zwłaszcza po długim okresie przechowywania oraz w trakcie długotrwałego transportu (Tomala i in., 2021; Małachowska i Tomala, 2023; Hasan i in., 2024).

W świetle powyższych rozważań utrzymanie wysokiej i stabilnej jakości jabłek wymaga podejścia zintegrowanego, obejmującego zarówno czynniki okresu okołozbiornego (warunki atmosferyczne, stan fizjologiczny owoców w momencie zbioru), jak i właściwy dobór technologii pozbiornych (regulację biosyntezy i działania etylenu, kontrolę składu gazowego atmosfery przechowalniczej), a także warunki dystrybucji oraz ekspozycji detalicznej. Ma to szczególne znaczenie w przypadku odmian o wysokich wymaganiach rynkowych w zakresie wyglądu i tekstury, takich jak jabłka z grupy 'Gala', dla których zachowanie odpowiedniej jędrności oraz ograniczenie ryzyka wystąpienia mączystości stanowią kluczowy warunek akceptacji konsumenckiej, zwłaszcza w kontekście długotrwałego przechowywania i obrotu handlowego.

2.2. Oczekiwania konsumentów

W handlu międzynarodowym zasadnicze znaczenie ma utrzymanie wysokiej jakości jabłek przez wiele miesięcy, ponieważ konsument dokonuje oceny owoców dopiero po zakończeniu często długotrwałego przechowywania, a także po etapie dystrybucji i ekspozycji detalicznej (Małachowska i Tomala, 2022; Hasan i in., 2024). Z tego względu rośnie znaczenie parametrów bezpośrednio determinujących akceptację konsumencką, przy czym dane literaturowe jednoznacznie wskazują, że decyzje

dotyczące pierwszego oraz powtórnego zakupu są kształtowane przez odmienne zespoły bodźców (Harker i in., 2003; Jaeger i in., 2018).

Na etapie zakupu dominującą rolę odgrywają cechy zewnętrzne jabłek. Konsumentów w pierwszej kolejności dokonują wyboru na podstawie wyglądu owoców, w tym barwy (jednorodnej i intensywnej), wielkości, regularności kształtu, a przede wszystkim braku widocznych uszkodzeń skórki (Jaeger i in., 2018; Radović i in., 2023). Owoce wykazujące poważne defekty jakościowe, takie jak objawy gnicia czy mechaniczne uszkodzenia skórki, są zazwyczaj jednoznacznie odrzucane przez konsumentów. Natomiast drobne niedoskonałości wizualne mogą być akceptowane warunkowo, najczęściej przy jednoczesnym obniżeniu postrzeganej jakości oraz akceptacji niższej ceny. Stopień tej akceptacji jest ponadto modyfikowany przez kontekst rynkowy, w tym narracje dotyczące ograniczania strat żywności i zrównoważonej produkcji, a także przez uwarunkowania kulturowe (Jaeger i in., 2018; Hueppe i Zander, 2023; Cao i in., 2025). W praktyce handlowej dodatkowo podkreśla się rolę rumieńca jako istotnego wskaźnika jakości, zwłaszcza w odniesieniu do odmian charakteryzujących się intensywnym wybarwieniem (Wong i in., 2020).

O decyzji o powtórnym zakupie w decydującym stopniu przesądza jednak tzw. jakość konsumpcyjna (smakowitość), której kluczowym komponentem jest tekstura owoców, a w szczególności jędrność miąższu. Szeroko zakrojone badania preferencji konsumenckich wskazują, że jędrność stanowi główny wyróżnik akceptacji, natomiast zawartość rozpuszczalnych substancji stałych (SSC) oraz kwasowość miareczkowa (TA) istotnie podnoszą ocenę sensoryczną przede wszystkim wówczas, gdy owoce osiągają już akceptowalną wartość jędrności (Harker i in., 2008). Równocześnie istotne jest zachowanie stabilności jakości w czasie – redukcja jędrności miąższu oraz kwasowości miareczkowej (TA) w trakcie przechowywania i w okresie symulowanego obrotu detalicznego koreluje ze spadkiem akceptowalności konsumenckiej oraz pogorszeniem wrażeń sensorycznych (Wills i in., 1980; Sredojevic i in., 2024). Różnice odmianowe w stabilności tekstury dodatkowo determinują ryzyko pogorszenia jakości owoców podczas ekspozycji w punktach sprzedaży detalicznej (Sredojevic i in., 2024). Z perspektywy logistycznej istotne jest zapewnienie możliwości obiektywnego monitorowania tekstury owoców, obejmującego korelację pomiarów instrumentalnych z oceną sensoryczną (Cliff i Bejaei, 2018; Bejaei i in., 2021), a także wdrażanie szybkich metod oceny jakości wewnętrznej, w tym technik spektralnych oraz podejść opartych na uczeniu maszynowym (Çetin i in., 2022; Grabska i in., 2023). Badania wykazały również,

że kontrola aktywności etylenu przy użyciu inhibitorów, takich jak 1-MCP (m.in. Harvista™, SmartFresh™), umożliwia skuteczniejsze utrzymanie jędrności miąższu jabłek podczas symulowanego obrotu detalicznego po długotrwałym przechowywaniu i transporcie (Musacchi i Serra, 2018).

2.3. Czynniki przedzbiorne: wpływ warunków atmosferycznych i terminu zbioru na potencjał przechowalniczy jabłek

Jakość jabłek po zbiorze jest w dużym stopniu uwarunkowana już w trakcie sezonu wegetacyjnego, kiedy kształtują się cechy wyjściowe decydujące o tempie zmian zachodzących podczas przechowywania i dalszej dystrybucji. Literatura wskazuje, że przebieg warunków atmosferycznych (temperatura, opady, wilgotność powietrza), dostępność wody oraz stan fizjologiczny owoców w momencie zbioru stanowią kluczowe czynniki determinujące jakość pozbiorną i trwałość przechowalniczą (Musacchi i Serra, 2018). Mechanizmy tego oddziaływania obejmują między innymi kształtowanie jędrności owoców w czasie zbioru, będącej silnym predyktorem trwałości podczas długotrwałego przechowywania, a także modyfikację ryzyka wystąpienia zaburzeń fizjologicznych oraz podatności na utratę jakości, takich jak spadek masy czy pogorszenie wyglądu. Czynniki te pozostają istotne zarówno w warunkach chłodniczych, jak i na końcowych etapach łańcucha dostaw (Musacchi i Serra, 2018; Hasan i in., 2024).

Związek między warunkami atmosferycznymi a potencjałem przechowalniczym jabłek jest szczególnie wyraźny w okresach krytycznych ich rozwoju. Lachapelle i in. (2013) wykazali, że dla jabłek odmiany 'McIntosh' warunki termiczne oraz suma opadów w określonych oknach fenologicznych wykazują istotną korelację z jędrnością owoców w momencie zbioru. Chłodniejsze okresy po kwitnieniu sprzyjały utrzymaniu wyższej jędrności, natomiast wyższe temperatury i zwiększone opady w późniejszej części sezonu były skorelowane z jej obniżeniem. Analiza regresji wykazała, że natężenie opadów w środkowej części sezonu wegetacji tłumaczyło znaczną część zmienności jędrności. Wyniki te podkreślają, że trwałość jabłek zależy nie tylko od warunków atmosferycznych wyrażonych jako wartości średnie dla całego okresu wegetacji, lecz również od ich rozkładu czasowego, co wskazuje na istotne znaczenie monitorowania i analizy tych warunków w krytycznych fazach rozwojowych owoców. Podobnie Nikitin i Makarkina (2019) wskazali, że warunki atmosferyczne w sezonie wegetacyjnym znacząco kształtują zdolność przechowalniczą jabłek odmian kolumnowych, wpływając zarówno na udział plonu handlowego po przechowywaniu, jak i na podatność owoców na oparzeliznę powierzchniową. Z praktycznego punktu widzenia wskazuje to na konieczność

uwzględniania specyfiki sezonu wegetacyjnego – w tym epizodów upałów, intensywnych opadów oraz wysokiej wilgotności powietrza – przy projektowaniu strategii przechowywania i dystrybucji owoców.

Wpływ warunków atmosferycznych ujawnia się również w kontekście lokalizacji sadu. Czynniki środowiskowe związane ze stanowiskiem – w tym temperatura, amplitudy dobowe, wysokość nad poziomem morza oraz bilans wodny – mogą istotnie modyfikować wielkość, wybarwienie i jędrność jablek oraz ryzyko chorób przechowalniczych, co w praktyce wymusza stosowanie podejścia uwzględniającego specyfikę stanowiska przy doborze warunków przechowywania (Argenta i in., 2022). Ujęcie to jest spójne z szerszym przeglądem czynników przedzbiorczych, w którym wykazano, że warunki środowiskowe i agrotechniczne w trakcie sezonu istotnie modulują parametry jakościowe oraz potencjał przechowalniczy jablek (Musacchi i Serra, 2018). W konsekwencji identyczne strategie przechowywania mogą prowadzić do zróżnicowanych wyników między latami i sadami, nawet w przypadku tej samej odmiany.

Kolejnym kluczowym czynnikiem determinującym potencjał przechowalniczy jablek jest ich stan fizjologiczny w momencie zbioru, który w praktyce decyduje o przebiegu zmian jakości podczas przechowywania. Analizy zależności między dojrzałością owoców, długością przechowywania a czasem symulowanego obrotu detalicznego wykazały, że precyzyjnie określony termin zbioru jest niezbędny dla utrzymania jakości owoców i minimalizacji strat pozbiorczych (Sredojević i in., 2025). Zbiór jablek w optymalnej dojrzałości, określanej za pomocą wskaźników takich jak jędrność miąższu, test skrobiowy czy indeks Streifa, pozwala pogodzić cele handlowe i konsumenckie – utrzymanie jędrności oraz akceptowalnego profilu smakowego przy minimalizacji ryzyka zaburzeń przechowalniczych. Wczesny zbiór sprzyja wysokiej jędrności, lecz ogranicza rozwój cech sensorycznych i wybarwienie owoców, natomiast opóźniony zbiór prowadzi do niższej jędrności miąższu, szybszego pogorszenia jego tekstury oraz zwiększonego ryzyka wystąpienia wybranych chorób i strat masy podczas przechowywania (Mohebi i in. 2017; Ganai i in., 2018; Sredojević i in., 2025). Mohebi i in. (2017) wykazali, że określenie „okna zbioru” jest kluczowe dla zapewnienia jednoczesnej jakości i trwałości jablek, a przesunięcie zbioru poza optymalny zakres znacząco ogranicza ich przydatność do długotrwałego przechowywania. Znaczenie odmianowe pozostaje tu szczególnie istotne – nowsze badania wskazują, że odmiany różnią się zarówno zakresem jędrności, jak i stabilnością tekstury podczas symulowanego

obrotu detalicznego, co podkreśla konieczność dostosowania terminu zbioru do określonego celu rynkowego (Sredojević i in., 2024).

Zwłaszcza ze względu na trudności organizacyjne i pogodowe w dotrzymaniu optymalnego terminu zbioru rośnie znaczenie strategii ograniczających skutki opóźnień oraz zwiększających margines bezpieczeństwa jakościowego partii owoców. W przypadku jabłek grupy 'Gala' wykazano, że stosowanie 1-MCP przed i po zbiorze sprzyja utrzymaniu wyższej jędrności podczas długotrwałego przechowywania, jednocześnie spowalniając tempo pogorszenia jakości owoców (Małachowska i Tomala, 2022). Kolejne badania wykazały, że oprócz terminu zbioru kluczowe znaczenie dla jakości i trwałości jabłek mają także warunki przechowalnicze oraz aplikacja 1-MCP, które modulują jędrność i kwasowość owoców – parametry bezpośrednio determinujące ich trwałość i akceptację konsumencką (Małachowska i Tomala, 2025). Tomala i in. (2023) wskazali że połączenie aplikacji 1-MCP przed i po zbiorze zapewnia szczególnie stabilną jędrność oraz zawartość ekstraktu (SSC) podczas przechowywania i symulowanego obrotu detalicznego jabłek odmiany 'Red Jonaprince'. Z perspektywy łańcucha dostaw istotne jest również to, że utrzymanie jędrności w końcowych etapach – po długotrwałym przechowywaniu i transporcie – może być wspierane przez technologie oparte na 1-MCP, co ogranicza ryzyko pogorszenia jakości w czasie, w której konsument dokonuje oceny jabłek (Małachowska i Tomala, 2023).

W podsumowaniu można stwierdzić, że warunki pogodowe przed zbiorem oraz termin zbioru działają łącznie jako kluczowe determinanty potencjału przechowalniczego jabłek. Rozkład temperatur i opadów w okresach krytycznych kształtuje jędrność owoców w momencie zbioru oraz ryzyko wystąpienia zaburzeń przechowalniczych, natomiast dojrzałość zbiorcza określa punkt wyjściowy zmian jakości jabłek podczas przechowywania i symulowanego obrotu detalicznego. W praktyce oznacza to konieczność sezonowego i lokalnego dostosowania decyzji dotyczących terminu zbioru jabłek oraz strategii przechowywania, a w przypadku ograniczeń operacyjnych – wspierania stabilności jakości poprzez ukierunkowane zabiegi pozbiornicze, w tym technologie oparte na 1-MCP (Małachowska i Tomala, 2025).

2.4. Rola etylenu – mechanizm spadku jakości

Etylen pełni kluczową rolę w regulacji dojrzewania i starzenia jabłek, wpływając na utratę jędrności, zmiany składu chemicznego oraz profil sensoryczny owoców (Wei i in., 2010; Ireland i in., 2014; Forlani i in., 2019; Sun i in., 2021; Fernández-Cancelo

i in., 2022; Tipu i Sherif, 2024; Akcay i in., 2025). Jako owoce klimakteryczne jabłka wchodzą w fazę przyspieszonego dojrzewania wraz ze wzrostem biosyntezy etylenu, którego nagły wzrost uruchamia skoordynowane zmiany fizjologiczne i molekularne, bezpośrednio prowadzące do pogorszenia jakości pozbiorczej, szczególnie w zakresie tekstury owoców (Ireland i in., 2014; Tucker i in., 2017). Oznacza to, że tempo utraty jędrności oraz ryzyko rozwoju niepożądanych zmian tekstury miąższu są w dużym stopniu zależne od intensywności sygnału etylenowego oraz odmianowej wrażliwości na jego działanie.

Mechanizm pogorszenia tekstury owoców można przedstawić jako szereg skoordynowanych zdarzeń: sygnał etylenowy inicjuje kaskadę regulacji transkrypcyjnej, aktywując geny związane z dojrzewaniem, w tym kodujące enzymy modyfikujące ścianę komórkową. Etylen wiąże się z receptorami i moduluje aktywność czynników transkrypcyjnych, takich jak ERF, NAC, WRKY, AP2-like i BBX, które kontrolują ekspresję genów dojrzewania, jednocześnie wzmacniając zarówno biosyntezę etylenu, jak i proces mięknięcia miąższu (Yang i in., 2013; Hu i in., 2020; Wang i in., 2024; Zhang i in., 2024a). Wykazano, że niektóre regulatory przyspieszają dojrzewanie – m.in. poprzez nasilenie sygnału etylenowego i ekspresji genów związanych z degradacją ściany komórkowej – podczas gdy inne działają hamująco, tłumiąc sygnalizację etylenową i opóźniając mięknięcie miąższu (Hu i in., 2020; Wang i in., 2024; Zhang i in., 2024a). W konsekwencji różnice odmianowe w stabilności tekstury mogą wynikać nie tylko z warunków przechowywania, lecz również z odmiennej „architektury” regulacji transkrypcyjnej odpowiedzi na etylen (Ding i in., 2024; Zhang i in., 2024a).

Najbardziej bezpośrednim skutkiem działania etylenu w kontekście tekstury owoców jest intensyfikacja modyfikacji ściany komórkowej, prowadząca do utraty chrupkości miąższu. Etylen stymuluje aktywność enzymów degradujących i przebudowujących polisacharydy ściany komórkowej, w tym poligalakturonazy, β -galaktozydazy, ksylanotransglukozylaz (XTH), celulaz oraz innych hydrolaz i transferaz. Enzymy te odpowiadają za rozluźnienie sieci celulozowo-hemicelulozowej oraz demetylację i depolimeryzację składników pektynowych w blaszce środkowej, co skutkuje osłabieniem struktury mechanicznej miąższu i zmniejszeniem jego jędrności (Yang i in., 2013; Tucker i in., 2017; Wang i in., 2024). W konsekwencji protopektyna ulega solubilizacji do frakcji pektyn rozpuszczalnych w wodzie, co prowadzi do obniżenia spójności blaszki środkowej oraz zwiększenia podatności komórek na separację. Procesy te skutkują istotnym spadkiem jędrności jabłek oraz przejściem

od tekstury chrupkiej i soczystej do struktury bardziej suchej i łatwo rozpadającej się podczas konsumpcji (Yang i in., 2013; Tucker i in., 2017). Zjawisko to ma również wymiar mikrostrukturalny – zwiększenie przestrzeni międzykomórkowych oraz osłabienie turgoru komórkowego sprzyjają rozwojowi mączystości, uznawanej za jeden z kluczowych defektów jakościowych pojawiających się w trakcie długotrwałego przechowywania jabłek (Ding i in., 2024). W ujęciu konsumenckim spadek jędrności oraz rozwój mączystości prowadzą do wyraźnego obniżenia akceptacji jabłek, co ma szczególne znaczenie w kontekście rosnących oczekiwań rynku dotyczących utrzymania stabilnej i wysokiej jakości sensorycznej (Shukla i Jharkharia, 2013; O’Neil i in., 2015).

Zależność między działaniem etylenu a pogorszeniem jakości jabłek jest dodatkowo modulowana przez warunki w czasie przechowywania. Ograniczenie dostępności tlenu, stosowanie kontrolowanej i ultraniskotlenowej atmosfery (KA/ULO), w tym w rozwiązaniach dynamicznych (DKA), a także blokowanie receptorów etylenu z wykorzystaniem 1-MCP, stanowią podstawowe strategie spowalniania procesów mięknięcia i utrzymania chrupkości jabłek podczas długotrwałego przechowywania (Gwanpua i in., 2017a; Gwanpua i in., 2017b; Dambros i in., 2022; Ting i in., 2023). Wykazano, że hamowanie działania etylenu może skutecznie przyczynić się do utrzymania parametrów tekstury, stanowiących jeden z kluczowych komponentów ogólnej oceny jakości owoców podczas długoterminowego przechowywania (Dambros i in., 2022). Jednocześnie literatura podkreśla istnienie swoistego „kosztu” nadmiernego lub niewłaściwie zaplanowanego ograniczania aktywności etylenu i dostępności tlenu, gdyż nieoptymalnie dobrany termin aplikacji 1-MCP lub zbyt restrykcyjne warunki obniżonego stężenia O_2 mogą zwiększać ryzyko wystąpienia zaburzeń fizjologicznych, takich jak brązowienie miąższu, szczególnie u odmian charakteryzujących się podwyższoną wrażliwością (DeEll i in., 2022). Oznacza to, że zarządzanie etylenem powinno być traktowane jako działanie precyzyjne, skuteczne w utrzymaniu jędrności oraz ograniczaniu rozwoju mączystości, lecz jednocześnie wymagające ścisłego dopasowania do odmiany, stopnia dojrzałości w czasie zbioru oraz składu atmosfery otaczającej przechowywane owoce (DeEll i in., 2022; Ting i in., 2023).

Reasumując, etylen inicjuje kaskadę zmian na poziomie transkrypcyjnym, prowadzących do aktywacji enzymów odpowiedzialnych za modyfikacje strukturalne ściany komórkowej owoców. W konsekwencji dochodzi do osłabienia połączeń międzykomórkowych, co skutkuje utratą jędrności, rozwojem mączystości oraz

pogorszeniem chrupkości jabłek w trakcie przechowywania. Z tego względu kontrola zarówno biosyntezy, jak i działania etyleny stanowi kluczowy element strategii ukierunkowanych na zachowanie wysokiej jakości owoców. Należy jednak podkreślić, że skuteczność tych działań w istotnym stopniu zależy od precyzyjnego doboru terminu oraz intensywności zastosowanej interwencji, tak aby proces mięknięcia został spowolniony bez jednoczesnego zwiększenia ryzyka wystąpienia defektów fizjologicznych podczas przechowywania.

2.5. 1-MCP – ograniczanie odpowiedzi na etylen i znaczenie terminu aplikacji

1-Metylocyklopropen (1-MCP) jest powszechnie stosowany jako kluczowe narzędzie spowalniania dojrzewania jabłek, umożliwiające utrzymanie jędrności, ograniczenie spadku kwasowości oraz spowolnienie zmian metabolicznych zachodzących w trakcie przechowywania i dystrybucji (Mattheis, 2008; Zhang i in., 2022a; Zhang i in., 2022b; Kwon i in., 2024). Liczne badania wykazują jednak, że skuteczność tego zabiegu jest silnie zróżnicowana i zależy od wielu czynników, w tym odmiany, stopnia dojrzałości w momencie zbioru, parametrów aplikacji oraz warunków przechowalniczych. Ponadto, z perspektywy zarządzania łańcuchem dostaw, istotne znaczenie ma precyzyjne określenie terminu zastosowania 1-MCP po zbiorze, ponieważ nawet niewielkie przesunięcia mogą wpływać na efektywność utrzymania jakości owoców. W konsekwencji, optymalizacja protokołów aplikacyjnych wymaga indywidualnego dopasowania do specyfiki odmianowej oraz warunków logistycznych, co podkreśla złożoność i wieloaspektowość strategii opóźniania dojrzewania w praktyce komercyjnej (Bai i in., 2005; Watkins i Nock, 2005; Huber i in., 2010; DeEll i in., 2016).

Mechanizm działania 1-metylocyklopropenu (1-MCP) polega na blokowaniu detekcji etyleny przez receptory komórkowe. Jako antagonist receptorów etylenowych, 1-MCP hamuje transmisję sygnału etylenowego, co wtórnie prowadzi do obniżenia ekspresji genów odpowiedzialnych za biosyntezę etyleny (np. *MdACS1*, *MdACO1*) oraz genów kodujących receptory i kluczowe elementy szlaku sygnałowego (np. *MdERS1/2*, *MdETR1/2*). W efekcie dochodzi do zmniejszenia endogennego stężenia etyleny, obniżenia intensywności oddychania oraz spowolnienia procesu dojrzewania owoców. W praktyce obserwuje się to jako wolniejszą utratę jędrności owoców, opóźnienie zmian barwy zasadniczej skórki oraz ograniczenie rozwoju mączystości, co przekłada się na przedłużenie okresu handlowej przydatności jabłek podczas przechowywania i dystrybucji (Dal Cin i in., 2006; Tatsuki i in., 2007). Skuteczność 1-MCP w jabłkach

jest zazwyczaj wyższa niż w wielu innych owocach klimakterycznych, co uzasadnia jego szczególne znaczenie w technologii przechowalniczej tego gatunku (Dal Cin i in., 2006; Watkins, 2006). Efekt korzystnego wpływu 1-MCP na jakość jabłek potwierdzono w szerokim zakresie odmian i reżimów przechowywania, przy czym metaanalizy wskazują, że wielkość uzyskiwanych korzyści jest uzależniona od temperatury i warunków przechowywania oraz parametrów zastosowanego zabiegu (Zhang i in., 2020).

Z punktu widzenia zastosowania 1-metylocyklopropenu istotne jest rozróżnienie strategii przedzbiorczej i pozbiorczej. Przedzbiorcze zastosowanie tego związku (preparat Harvista™) ogranicza biosyntezę etylenu w okresie zbioru, stabilizuje jędrność oraz kwasowość miareczkową (TA) owoców, a ponadto umożliwia przesunięcie terminu zbioru bez gwałtownego pogorszenia jakości. Potwierdzono to w badaniach przeprowadzonych na jabłkach odmian 'Szampion' oraz 'Red Jonaprince', w których przedzbiorcze zastosowanie 1-MCP pozwalało zarówno opóźnić zbiór, jak i ograniczać pogorszenie jakości owoców podczas przechowywania. (Tomala i in., 2020a; Tomala i in., 2020b). Podobne obserwacje odnotowano w badaniach dotyczących odmian z grupy 'Gala', gdzie przedzbiorcza aplikacja 1-MCP sprzyjała utrzymaniu wysokiej jędrności owoców podczas długotrwałego przechowywania, natomiast aplikacja pozbiorcza umożliwiała osiągnięcie stabilności jakościowej porównywalnej z warunkami przechowywania optymalnymi technologicznie (Małachowska i Tomala, 2022). Jednocześnie wykazano, że tego rodzaju zabieg może zwiększać ryzyko wystąpienia niektórych zaburzeń fizjologicznych, takich jak uszkodzenia wywołane nadmiarem CO₂ czy brązowienie miąższu, przy czym kierunek i intensywność tych zmian są zależne od odmiany oraz temperatury przechowywania i stosowanych warunków przechowywania KA/UŁO (DeEll i in., 2022; Sidhu i in., 2024). Oznacza to, że zabiegi przedzbiorcze wymagają starannej oceny bilansu korzyści i ryzyka w odniesieniu do przewidywanego czasu przechowywania oraz docelowych warunków przechowywania.

W przypadku pozbiorczej aplikacji 1-MCP kluczowym czynnikiem jest czas, jaki upływa od zbioru jabłek do wykonania zabiegu. Tatsuki i in. (2007) wykazali, że wczesne zastosowanie 1-MCP po zbiorze powoduje silniejsze i dłużej utrzymujące się zahamowanie zarówno produkcji etylenu, jak i ekspresji genów zaangażowanych w ten proces. Opóźnienie zabiegu skutkuje natomiast słabszą kontrolą tempa wydzielania etylenu oraz krótszym utrzymaniem jakościowych efektów w owocach. Uzupełniające

badania modelowe Gwanpua i in. (2017a i b) wykazały, że czas aplikacji 1-MCP może stanowić czynnik bardziej krytyczny niż sama dojrzałość zbiorcza. Natychmiastowe zastosowanie 1-MCP niemal całkowicie hamowało odpowiedź owoców na etylen, podczas gdy kilkudniowe opóźnienie prowadziło do jedynie częściowej inhibicji i przyspieszonego mięknięcia. Wyniki sugerujące ograniczony wpływ krótkich opóźnień w przypadku jabłek odmiany 'Fuji' nie powinny być uogólniane, gdyż reakcja na 1-MCP jest wyraźnie odmianowo- i reżimowo-zależna (Yoo i Kang, 2021). Nie bez znaczenia pozostaje również fakt, że odpowiedź owoców na 1-MCP zależy od warunków przechowywania: w wielu przypadkach silniejszy efekt obserwuje się w kontrolowanej atmosferze niż w atmosferze normalnej, co ma istotne znaczenie przy planowaniu długotrwałego przechowywania jabłek dla rynków odległych (Watkins i in., 2000).

Znaczenie terminu aplikacji 1-MCP ujawnia się szczególnie w scenariuszach logistycznych, w których jabłka muszą zachować wysoką jędrność podczas długotrwałego transportu i długiego obrotu detalicznego. W przypadku jabłek odmiany 'Idared' wykazano, że pozbiornicze zastosowanie 1-MCP wydłuża trwałość owoców i poprawia utrzymanie jędrności w warunkach transportu dalekodystansowego. Ponadto w symulacjach długotrwałego transportu połączenie 1-MCP z opakowaniem typu MAP dodatkowo wspiera utrzymanie jakości owoców (Tomala i in., 2020c; Tomala i in., 2021). Małachowska i Tomala (2023) wykazali, że zastosowanie 1-MCP pozwala zachować jędrność owoców podczas długotrwałego obrotu detalicznego po przedłużonym przechowywaniu i symulowanym transporcie, co bezpośrednio wpływa na jakość ocenianą przez konsumenta (Tatsuki i in., 2007).

2.6. Warunki przechowywania – KA, ULO i DKA

Przechowywanie jabłek w warunkach kontrolowanej atmosfery stanowi – obok modulacji odpowiedzi na etylen – kluczowy sposób utrzymania wysokiej jakości owoców w długim okresie przechowywania. Główną korzyścią stosowania technologii takich jak KA, ULO i DKA jest ograniczenie tempa oddychania i procesów starzenia poprzez obniżenie stężenia O_2 oraz utrzymanie bezpiecznego poziomu CO_2 , co spowalnia metabolizm owoców i pośrednio hamuje działanie etylenu (Mattheis, 2008; Büchele i in., 2023; Khalifeh i in., 2025). Różnice między tymi technologiami wynikają przede wszystkim z zakresu redukcji stężenia tlenu oraz sposobu kontroli dolnej granicy tlenowej (LOL), co decyduje o stabilności jakości owoców i ryzyku występowania zaburzeń fizjologicznych.

W standardowych warunkach KA (CA) typowe stężenia tlenu i CO₂ rzędu kilku procent istotnie spowalniają oddychanie owoców w porównaniu z przechowywaniem w atmosferze normalnej. Jednak u niektórych odmian jabłek nadal obserwuje się relatywnie wyższą aktywność etylenu oraz większą podatność na niektóre zaburzenia fizjologiczne w porównaniu z warunkami przechowalniczymi o niskim stężeniu tlenu (Watkins i in., 2000). Z tego względu przechowywanie jabłek w warunkach ULO, z obniżonym do ok. 1% stężeniem O₂, stanowi skuteczniejszą strategię utrzymania jędrności i ograniczania strat jakości niż standardowa KA. Badania na odmianach handlowych wykazały, że ULO, a szczególnie dynamiczne systemy DKA, pozwalają uzyskać wyższą jędrność owoców, m.in. w przypadku 'Royal Gala' (Thewes i in., 2015; Weber i in., 2015) oraz 'Fuji Suprema' (Thewes i in., 2017). Podobne zależności zaobserwowano także u jabłek odmian 'Golden Delicious' i 'Elstar', gdzie warunki przechowywania o niższym stężeniu O₂ sprzyjały lepszemu zachowaniu tekstury w porównaniu ze standardową KA (Veltman i in., 2003; Gasser i in., 2005).

Najbardziej zaawansowaną technologią przechowalniczą jest DKA (DCA), w której stężenie O₂ jest dynamicznie sterowane tuż powyżej dolnej granicy tlenowej danej odmiany, np. na podstawie ilorazu oddechowego (RQ) lub metod opartych na fluorescencji chlorofilu (CF) bądź produkcji CO₂ (DCA-CD). Mditshwa i in. (2018) wykazali, że DKA skutecznie ogranicza oddychanie i produkcję etylenu, umożliwiając utrzymanie wysokiej jakości owoców, przy czym wymaga precyzyjnej kontroli w celu minimalizacji ryzyka uszkodzeń niskotlenowych i CO₂. Badania porównawcze wskazują, że DKA może być najbardziej efektywną strategią utrzymania jakości w porównaniu ze standardową KA i ULO (Onursal i Koyuncu, 2021), a rozwiązania RQ-DCA pozwalają stabilnie prowadzić przechowywanie bardzo blisko granicy beztlenowej bez wyraźnych oznak fermentacji, utrzymując jędrność i ograniczając zaburzenia fizjologiczne (Bessemans i in., 2016).

W przypadku odmian z grupy 'Gala' wykazano, że kombinacja DCA-CF bardzo skutecznie zapewnia utrzymanie wysokiej jakości jabłek, przy czym warunki ULO dają efekt stosunkowo zbliżony, co wskazuje, że kluczowym czynnikiem stabilizacji jakości owoców na wysokim poziomie jest utrzymywanie niskiego stężenia tlenu. (Thewes i in., 2015). Wyniki dotyczące zawartości kwasów organicznych nie są jednoznaczne. W przypadku jabłek odmiany 'Royal Gala' stwierdzono wyższą kwasowość miareczkową owoców przechowywanych w DKA w porównaniu z KA (Weber i in., 2015), podczas gdy inne badania nie wykazały istotnych różnic w całkowitej kwasowości (TA) ani

zawartości ekstraktu w owocach między DKA, ULO i CA (Thewes i in., 2017), co wskazuje na zależność tych wyróżników od odmiany we współdziałaniu z warunkami przechowywania.

W tym kontekście szczególne znaczenie zyskuje współdziałanie technologii niskotlenowych z zastosowaniem 1-MCP. Wykazano, że aplikacja 1-MCP w warunkach KA/CA, a nawet w atmosferze normalnej, stanowi dobrze udokumentowaną strategię utrzymania wysokiej jędrności i kwasowości owoców oraz ograniczenia produkcji etylenu w porównaniu z wariantami pozbawionymi tego związku (Watkins i in., 2000; Watkins i Nock, 2012; Yoo i Kang, 2021). Może to mieć praktyczne znaczenie w sytuacjach, gdy infrastruktura ULO/DKA jest niedostępna lub gdy część łańcucha dostaw przebiega w atmosferze normalnej, np. podczas transportu dalekodystansowego. W przypadku jabłek odmiany 'Idared' wykazano, że 1-MCP poprawia jędrność i trwałość owoców w takich warunkach, a połączenie 1-MCP z MAP dodatkowo wspiera utrzymanie jakości w wielotygodniowej symulacji przewozu (Tomala i in., 2020c; Tomala i in., 2021). Wyniki te wskazują, że 1-MCP może częściowo kompensować brak technologii niskotlenowych w kolejnych etapach łańcucha logistycznego.

W warunkach ULO rola 1-MCP często ma charakter dodatkowej stabilizacji. Badania przeprowadzone na jabłkach odmiany 'Red Jonaprince' wykazały, że pozbiornicze zastosowanie 1-MCP skutecznie utrzymywało jakość owoców w ULO, natomiast aplikacja przedzbiornicza przynosiła ograniczoną korzyść i nie zawsze była uzasadniona ekonomicznie (Tomala i in., 2022; Tomala i in., 2023). Jednocześnie w przypadku opóźnionego terminu zbioru lub partii jabłek obarczonych wysokim ryzykiem szybkiej utraty jędrności, zastosowanie 1-MCP może poprawiać stabilność tej cechy także w warunkach ultraniskotlenowych, co podkreśla zasadność stosowania strategii dostosowanej do danej partii owoców zamiast jednego, uniwersalnego schematu dla całej produkcji (Watkins i Nock, 2012; Tomala i in., 2023). Integracja technologii niskotlenowych z regulacją produkcji etylenu przy użyciu 1-MCP może prowadzić do modyfikacji profilu aromatycznego oraz percepcji jakości owoców; różnice te ujawniają się nie tylko w pomiarach instrumentalnych, lecz również w ocenach konsumenckich (Juhņeviča-Radenkova i Radenkova, 2016).

Najbardziej efektywne oddziaływanie na jakość jabłek obserwuje się w przypadku technologii DKA. Poprzez silne ograniczenie tempa oddychania oraz produkcji etylenu DKA może stanowić jedną z najbardziej efektywnych strategii utrzymania jędrności i kontroli zaburzeń fizjologicznych, osiągając efekty porównywalne z kombinacją CA +

1-MCP, co czyni ją atrakcyjną opcją również w kontekście przechowywania jabłek bez stosowania regulatorów syntezy etylenu (Mditshwa i in., 2018; Thewes i in., 2021). Z drugiej strony badania na odmianach jabłek z grupy 'Gala' wykazały, że DCA-RQ może przewyższać warianty KA/ULO z 1-MCP w utrzymaniu jakości po długotrwałym przechowywaniu oraz w warunkach symulowanego, przedłużonego obrotu detalicznego, uwzględniając przy tym strategię temperaturowe i potencjalne oszczędności energii (Both i in., 2018; Wendt i in., 2022). Jednocześnie literatura wskazuje, że zarówno kombinacja CA + 1-MCP, jak i niektóre warianty DKA mogą ograniczać emisję związków lotnych i wpływać na profil aromatyczny owoców, przy czym „odzyskiwanie” tego profilu po przechowywaniu zależy od zastosowanego systemu oraz odmiany (Schultz i in., 2023). Najnowsze badania sensoryczne wykazują, że przy jednoczesnym stosowaniu 1-MCP różnice między ULO a DKA w podstawowych parametrach instrumentalnych mogą ulegać zmniejszeniu, ujawniając się głównie w profilu związków lotnych i jakości sensorycznej owoców (de Candido de Oliveira i in., 2025). Wyniki te potwierdzają, że decyzje technologiczne nie powinny opierać się wyłącznie na utrzymaniu jędrności, lecz uwzględniać również atrybuty sensoryczne istotne z punktu widzenia konsumenta.

2.7. Transport i długość symulowanego obrotu detalicznego – końcowy etap łańcucha logistycznego jako źródło pogorszenia jakości owoców

W ostatnich latach w literaturze naukowej coraz wyraźniej akcentuje się, że końcowa jakość jabłek oferowanych konsumentom jest determinowana nie tylko warunkami przechowywania, lecz w równym stopniu procesami zachodzącymi po jego zakończeniu. Owoce opuszczające warunki chłodnicze wchodzą w etap zwiększonej podatności fizjologicznej na czynniki stresowe, w tym fluktuacje temperatury, obniżoną wilgotność względną powietrza oraz obciążenia mechaniczne charakterystyczne dla transportu i dystrybucji. W rezultacie końcowe fazy łańcucha logistycznego mogą generować dodatkowe, a w niektórych przypadkach nawet dominujące obniżenie parametrów jakościowych, wyrażające się spadkiem jędrności miąższu, zmianami kwasowości miareczkowej (TA), ubytkiem masy oraz pogorszeniem cech zewnętrznych owoców, mimo prawidłowo prowadzonego procesu przechowywania (Małachowska i Tomala, 2023; Hasan i in., 2024). Wyniki badań wskazują ponadto, że znaczenie samego etapu transportu bywa relatywnie mniejsze niż skumulowany efekt czasu ekspozycji oraz warunków panujących po wyjęciu owoców z chłodni. Okoliczność ta uzasadnia konieczność oceny jakości jabłek w ujęciu całościowym, obejmującym cały łańcuch dystrybucyjny, a nie wyłącznie w momencie opuszczenia komory chłodniczej, gdyż

dopiero takie podejście pozwala na rzetelne określenie zmian parametrów jakościowych jabłek zachodzących na drodze od producenta do konsumenta (Małachowska i Tomala, 2023; Hasan i in., 2024).

Jednym z kluczowych mechanizmów odpowiedzialnych za obniżenie parametrów jakościowych jabłek w końcowych etapach łańcucha dystrybucyjnego jest oddziaływanie czynników czasowo-temperaturowych. Wydłużony okres transportu w warunkach chłodniczych, a następnie ekspozycja owoców na podwyższoną temperaturę, odpowiadającą długości symulowanego obrotu detalicznego, prowadzą do intensyfikacji procesów metabolicznych. Skutkiem tych przemian jest przyspieszone mięknięcie miąższu owoców oraz obniżenie kwasowości miareczkowej. Badania dotyczące jakości jabłek w warunkach długotrwałego symulowanego obrotu detalicznego, prowadzone po długim okresie przechowywania oraz symulowanym transporcie, wykazały, że regulacja procesów dojrzewania z wykorzystaniem 1-metylocyklopropenu (1-MCP), stosowanego w formie aplikacji przedzbiorczej i/lub pozbiorczej (m.in. w postaci preparatów Harvista™ i SmartFresh™), umożliwia istotne ograniczenie utraty jędrności miąższu jabłek w czasie 14-dniowego okresu symulowanego obrotu detalicznego po przechowywaniu i transporcie, niezależnie od terminu ich zbioru (Małachowska i Tomala, 2023). Efekt ochronny zastosowania 1-MCP w kontekście przygotowania partii jabłek do długodystansowej dystrybucji wykazano również w przypadku odmiany 'Idared'. Badania te wskazują na wydłużenie trwałości przechowalniczej oraz lepsze zachowanie jędrności owoców w warunkach transportu (Tomala i in., 2020a), a także na możliwość utrzymania kluczowych parametrów jakościowych przy wydłużonym czasie symulowanego transportu (Tomala i in., 2021). Z punktu widzenia praktyki produkcyjnej i logistycznej oznacza to, że ryzyko niekorzystnych zmian parametrów jakościowych istotnie wzrasta wówczas, gdy po zakończeniu długotrwałego przechowywania owoce poddawane są przedłużonej ekspozycji na warunki podwyższonej temperatury, a jednocześnie nie zastosowano skutecznych metod ograniczania intensywności dojrzewania jabłek, w tym regulacji biosyntezy oraz aktywności etylenu (Thewes i in., 2015; Wendt i in., 2022; Małachowska i Tomala, 2023).

Drugim istotnym czynnikiem wpływającym na obniżenie parametrów jakościowych owoców są oddziaływania mechaniczne, w szczególności wibracje oraz nieprawidłowe obchodzenie się z ładunkiem. W warunkach modelowych wykazano, że wibracje występujące podczas transportu oraz krótkotrwałego magazynowania istotnie oddziałują na cechy jakościowe jabłek, zwiększając ich podatność na występowanie

defektów powierzchniowych o charakterze estetycznym, a także na rozwój uszkodzeń, które ujawniają się dopiero w trakcie długotrwałego symulowanego obrotu detalicznego (Thewes i in., 2021). Co istotne, skutki stresu mechanicznego nie zawsze ujawniają się bezpośrednio po dostarczeniu owoców do odbiorcy – często stają się widoczne dopiero po kilku dniach ekspozycji pozachłodniczej, w czasie której nasila się intensywność oddychania, a spójność struktury tkanek ulega dalszemu pogorszeniu. Z praktycznego punktu widzenia transport pełni zatem nie tylko funkcję przemieszczania owoców, lecz także stanowi etap inicjowania i kumulowania mikrouszkodzeń, które w konsekwencji prowadzą do obniżenia jędrności, pogorszenia cech wizualnych oraz zmniejszenia akceptowalności konsumenckiej (Both i in., 2017).

Trzecim czynnikiem o istotnym znaczeniu dla jakości handlowej jabłek jest utrata wody wskutek transpiracji w trakcie dystrybucji. Badania poświęcone temu zjawisku wykazały, że ubytek masy stanowi jeden z kluczowych wskaźników obniżenia jakości, gdyż jednocześnie wpływa na cechy wizualne owoców (np. marszczenie skórki), odczuwaną strukturę miąższu, a także prowadzi do bezpośredniego zmniejszenia masy owoców (Soldateli i in., 2025). Znaczenie właściwej kontroli wilgotności względnej i temperatury powietrza, jako kluczowych narzędzi ograniczania strat pozbiornych w całym łańcuchu dystrybucyjnym, zostało również zaakcentowane w analizie czynników przed- i pozbiornych (Both i in., 2017). W tym kontekście rozwiązania opakowaniowe, w szczególności opakowania o modyfikowanej atmosferze (MAP), pełnią funkcję narzędzia ograniczającego transpirację oraz stabilizującego mikroklimat w bezpośrednim otoczeniu owoców. Badania dotyczące zastosowania MAP, w tym podejścia projektowego opartego na modelowaniu matematycznym, wykazują możliwość istotnego wydłużenia trwałości przechowalniczej oraz ograniczenia spadku jakości w dłuższym horyzoncie dystrybucyjnym (Both i in., 2018). Ponadto prace nad synergistycznym oddziaływaniem 1-MCP i MAP w warunkach symulowanego długodystansowego transportu potwierdzają potencjał tej kombinacji w utrzymywaniu wysokiej jakości jabłek odmiany 'Idared' w trakcie przedłużonego okresu transportu (Tomala i in., 2021). Jednocześnie wyniki badań dotyczących jabłek odmiany 'Idared' wskazują, że efektywność połączenia MAP i 1-MCP może zależeć od analizowanego parametru jakościowego, na przykład stabilności kwasowości miareczkowej (TA) (Tomala i in., 2020c). Podkreśla to konieczność dostosowania stosowanej technologii do zamierzonego celu (utrzymanie jędrności, zachowanie wyglądu, ograniczenie ubytku masy) oraz do specyficznych cech odmiany.

Należy podkreślić, że wrażliwość owoców na końcowe etapy łańcucha dystrybucyjnego jest również zależna od ich dojrzałości w czasie zbioru w interakcji z długością przechowywania. Przykładowo, w badaniach przeprowadzonych na jabłkach odmiany 'Granny Smith' wykazano, że czas przechowywania stanowi główny czynnik determinujący parametry jakościowe owoców, jednak termin zbioru oraz czynności pozbiornicze znacząco modulują tempo i charakter zmian zachodzących podczas długotrwałego symulowanego obrotu detalicznego (Sredojevic i in., 2025). Oznacza to, że obniżenie jakości ma charakter kumulatywny – o końcowym stanie partii jabłek decyduje zarówno jej historia (termin zbioru, długość przechowywania, warunki transportu), jak i intensywność oddziaływania czynników stresowych w trakcie dystrybucji oraz ekspozycji handlowej (Małachowska i Tomala 2023; Hasan i in., 2024; Sredojevic i in., 2025).

Z punktu widzenia ograniczania strat szczególnie obiecujące wydają się rozwiązania integrujące kontrolę dojrzewania z modyfikacją atmosfery przechowywania oraz optymalizacją procesów logistycznych. Badania nad aplikacją 1-MCP w fazie przed- i pozbiorniczej wykazały, że stosowanie tego związku pozwala na utrzymanie większej stabilności jędrności i innych parametrów jakościowych jabłek zarówno podczas przechowywania, jak i w trakcie długotrwałego symulowanego obrotu detalicznego (Tomala i in., 2023). Ponadto prace porównujące efekty ekstremalnego transportu oraz długości symulowanego obrotu detalicznego wykazały przewagę podejść łączących zaawansowane strategie przechowywania (np. DCA-CF) z zastosowaniem 1-MCP w utrzymaniu jakości owoców w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi (Stürz i in., 2024). Jednocześnie wyniki badań dotyczące wpływu zastosowanej technologii przechowalniczej (np. ULO vs NA) na utrzymanie jakości jabłek w trakcie długotrwałego symulowanego obrotu detalicznego potwierdzają, że warunki przechowywania w istotny sposób określają punkt wyjścia partii owoców do dystrybucji. Niemniej jednak, ostateczny etap łańcucha logistycznego – obejmujący transport, magazynowanie pozachłodnicze oraz ekspozycję handlową – często odgrywa decydującą rolę w kształtowaniu jakości konsumenckiej, modulując parametry fizjologiczne i sensoryczne owoców niezależnie od wcześniejszego przebiegu przechowywania (Korićanac i in., 2019).

W zarządzaniu ryzykiem jakościowym rosnące znaczenie zyskują narzędzia predykcyjne oraz systemy wspomaganie decyzji. Modele empiryczne umożliwiają prognozowanie zmian parametrów jakościowych, takich jak jędrność czy ubytek masy,

w funkcji czasu i temperatury, co może wspierać planowanie dystrybucji oraz dobór optymalnych warunków środowiskowych dla poszczególnych partii owoców (Sanad Alsbu i in., 2023). Z kolei podejścia oparte na uczeniu maszynowym, takie jak PLS czy sieci neuronowe (ANN), uznaje się za skuteczne narzędzia do prognozowania długości okresu przydatności jabłek do spożycia w zależności od warunków temperaturowych, przy czym wyższe temperatury przyspieszają spadek kwasowości miąższu (Zhangu i in., 2022a; Zhangu i in., 2022b). Na poziomie łańcucha dostaw rozwijane są również ramy decyzyjne działające w czasie rzeczywistym, umożliwiające identyfikację kluczowych wskaźników jakości jabłek oraz czynników środowiskowych w celu minimalizacji strat owoców o wysokiej podatności na gnicie (Xu i in., 2020). W szerszej perspektywie optymalizacja łańcuchów dostaw, uwzględniająca jednocześnie aspekty jakościowe oraz uwarunkowania operacyjne (np. kontrakty chłodnicze, wybór dostawców, cele środowiskowe), stanowi istotny kierunek badań wspierający ograniczanie strat w skali systemowej (Boschiero i in., 2019; Mateo-Fornést i in., 2021). Znaczenie tego podjęcia wzrasta w kontekście opracowywania modeli integrujących dynamikę pogarszania jakości produktów z kryteriami ekonomicznymi i środowiskowymi, co pozwala na bardziej kompleksowe zarządzanie ryzykiem w łańcuchach dystrybucyjnych (Wani i Mishra, 2022; Khazaeli i in., 2023).

Transport oraz długość symulowanego obrotu detalicznego należy traktować jako etap krytyczny w łańcuchu logistycznym jabłek, gdyż w tym okresie kumulują się czynniki najsilniej obniżające jakość owoców – w szczególności wahania i niewłaściwe stosowanie temperatury, oddziaływania mechaniczne związane z przewozem oraz ubytki wody wynikające z niewystarczającej kontroli wilgotności względnej i doboru opakowania.

Analiza dostępnych wyników badań wskazuje, że skuteczne ograniczenie strat wymaga działań komplementarnych: konsekwentnego utrzymania reżimu temperatury i wilgotności, minimalizacji wibracji i uszkodzeń mechanicznych, regulacji dojrzewania poprzez hamowanie działania etylenu (np. użycie 1-MCP), a także zastosowania opakowań zmniejszających transpirację, w tym opakowań o modyfikowanej atmosferze (MAP). Efektywność takiego zintegrowanego podejścia dodatkowo wzmacnia wykorzystanie modeli szacujących zmiany jakości oraz systemów wspomaganie decyzji, które umożliwiają zarządzanie ryzykiem jakościowym w ujęciu całego łańcucha dostaw, a nie wyłącznie na etapie przechowywania.

2.8. Luka badawcza

Dotychczasowe badania wykazują, że stabilność jędrności i kwasowości jabłek w długotrwałym łańcuchu przechowalniczo-dystrybucyjnym zależy od terminu zbioru, aktywności etylenu, stosowanej technologii przechowywania (KA/UŁO/DKA) oraz aplikacji 1-MCP. Mechanizmy mięknięcia owoców oraz skuteczność 1-MCP i reżimów niskotlenowych są dobrze udokumentowane, niemniej wciąż brakuje wyników bezpośrednio przydatnych dla decyzji eksportowych, podejmowanych w skali całego łańcucha dostaw.

W literaturze brakuje badań prowadzonych w układzie „end-to-end”, które jednocześnie oceniałyby termin zbioru i strategię stosowania 1-MCP (przedzbiorczo, pozbiorczo lub łącznie) w warunkach niskotlenowych oraz monitorowały jakość jabłek po przechowywaniu, transporcie i podczas długotrwałego symulowanego obrotu detalicznego. W konsekwencji pozostaje niejasne, czy przewaga poszczególnych strategii utrzymuje się w fazie pozachłodniczej, gdy spadek jakości owoców ulega przyspieszeniu.

Drugim istotnym niedoborem wiedzy jest ograniczone zrozumienie skuteczności bardzo niskich, stałych poziomów CO₂ i O₂ stosowanych w układach „quasi-DKA” bez dynamicznego wyznaczania dolnej granicy tlenowej (RQ, CF, DCA-CD). Literatura koncentruje się przede wszystkim na DKA jako systemie dynamicznym, dlatego brakuje porównań wskazujących, w jakim stopniu utrzymywanie stężenia 0,6% CO₂ i 0,6% O₂, bez sterowania dynamicznego, przewyższa UŁO w utrzymaniu jędrności i kwasowości owoców, zwłaszcza podczas długotrwałego przechowywania.

Trzecia luka ma charakter mechanistyczno-wdrożeniowy: ACC jest rzadko analizowany jako wskaźnik „potencjału etylenowego” partii jabłek w układach wieloczynnikowych obejmujących termin zbioru, stosowanie 1-MCP, warunki przechowywania, długość przechowywania, czas transportu oraz okres shelf-life. Brak takich danych ogranicza możliwość rozróżnienia, czy obserwowane różnice jakości owoców wynikają przede wszystkim z hamowania biosyntezy etylenu poprzez blokowanie jego receptorów przez 1-MCP, z ograniczenia metabolizmu ACC spowodowanego bardzo niskim stężeniem O₂, czy też z wyraźnie zmniejszonej produkcji samego prekursora etylenu, kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksylowego.

W konsekwencji brakuje wyników badań o charakterze decyzyjnym, które jednoznacznie określałyby optymalną kombinację terminu zbioru, strategii zastosowania 1-MCP oraz technologii przechowywania (UŁO vs quasi-DKA) w celu zapewnienia

stabilności jędrności, kwasowości (TA) i zawartości ekstraktu (SSC) w scenariuszach obejmujących długotrwałe przechowywanie, transport oraz przedłużony obrót detaliczny.

3. Cel, zakres badań i hipotezy badawcze

Celem niniejszych badań była ocena wpływu terminu zbioru oraz strategii zastosowania 1-metylocyklopropenu (1-MCP) – przedzbiorczo (Harvista™), pozbiorczo (SmartFresh™) oraz w wariancie łączonym – na utrzymanie jakości jablek odmiany ‘Gala Schniga’. Badania prowadzono w połączeniu z przechowywaniem jablek w warunkach ULO (1,2% CO₂ i 1,2% O₂) oraz w warunkach quasi-DKA (0,6% CO₂ i 0,6% O₂). Analizowano jakość owoców w trakcie długotrwałego obrotu towarowego, obejmującego okres przechowywania, transport oraz symulowany obrót detaliczny. Jakość jablek oceniano na podstawie jędrności (F), kwasowości miareczkowej (TA), zawartości ekstraktu (SSC) oraz stężenia ACC, będącego prekursorem etylenu.

Warto podkreślić, że wariant przechowywania określany jako „quasi-DKA” nie obejmuje dynamicznego wyznaczania dolnej granicy tlenowej z użyciem standardowych narzędzi sterowania, takich jak iloraz oddechowy (RQ), fluorescencja chlorofilu (CF) czy pomiar produkcji CO₂ (DCA-CD).

Hipotezy główne

1. Jakość jablek odmiany ‘Gala Schniga’ zależy od terminu zbioru, terminu zastosowania 1-MCP oraz technologii i czasu przechowywania, przy czym pozbiorcze stosowanie 1-MCP wpływa silniej na utrzymanie jakości owoców niż aplikacja przedzbiorcza.
2. Zastosowanie 1-MCP, termin zbioru oraz długość transportu istotnie modyfikują parametry jakościowe jablek eksportowanych na odległe rynki, również po długotrwałym przechowywaniu.

Hipotezy szczegółowe

1. Pozbiorcze zastosowanie związku 1-MCP skuteczniej ogranicza spadek jędrności, kwasowości i zawartość ACC niż przedzbiorcze stosowanie.
2. Termin zbioru (optymalny vs. opóźniony) istotnie modyfikuje parametry jakościowe jablek po przechowywaniu i okresie symulowanego obrotu.
3. Wydłużenie czasu przechowywania pogarsza jakość jablek niezależnie od terminu zastosowania 1-MCP.

4. Technologia quasi-DKA efektywniej niż ULO ogranicza spadek jędrności i kwasowości oraz wzrost zawartości ACC podczas długotrwałego przechowywania.
5. Kombinacja przed- i pozbiorczego zastosowania 1-MCP jest najskuteczniejszą metodą utrzymania jędrności jabłek po długotrwałym transporcie i wydłużonym obrocie hurtowo-detalicznym, niezależnie od terminu zbioru i długości przechowywania.

Część A. Czynniki modyfikujące jakość pozbiorczą jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w warunkach długotrwałego przechowywania

4.A. Materiały i metody

4.A.1. Materiał roślinny i układ doświadczenia

Badania przeprowadzono na jabłkach odmiany ‘Gala Schniga’ w trzech kolejnych sezonach przechowalniczych. Sezon 2021/2022, opisany szczegółowo w **Publikacji I (PI)**, obejmował ocenę fizjologiczną wpływu przed- i pozbiorczego zastosowania 1-metylocyklopropenu (1-MCP) na jakość owoców przechowywanych w warunkach zbliżonych do dynamicznie kontrolowanej atmosfery (DKA). **Publikacja II (PII)** obejmowała wyniki z dwóch kolejnych sezonów przechowalniczych (2022/2023 oraz 2023/2024) i stanowiła kontynuację oraz rozszerzenie wcześniejszych badań. Pozwoliło to na analizę wielosezonową, porównanie różnych technologii przechowywania oraz ilościową ocenę względnego wpływu poszczególnych czynników na jakość owoców przy użyciu metod statystyki wielowymiarowej.

Jabłka pochodziły z sadu doświadczalnego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie-Wilanowie (SGGW; 52°9'36,1" N, 21°5'58,2" E). Drzewa, szczepione na podkładce M.9, posadzono w 2014 roku w rozstawie 3,0 × 1,0 m i prowadzono w systemie wrzeciona. Warunki agrotechniczne oraz sposób prowadzenia sadu były jednolite w całym okresie badań.

W każdym sezonie owoce zbierano w dwóch fazach dojrzałości, określonych na podstawie indeksu Streifa, zgodnie z metodyką opisaną we wcześniejszych pracach **(PI, PII)**:

- **optymalny termin zbioru (OHD)** – odpowiadający dojrzałości zalecanej dla długoterminowego przechowywania,
- **opóźniony termin zbioru (DH)** – przypadający około 14 dni po OHD, charakteryzujący się bardziej zaawansowaną dojrzałością fizjologiczną owoców.

Daty zbioru w poszczególnych sezonach:

- sezon 2021/2022 (PI): OHD – 9 września 2021 r., DH – 23 września 2021 r.
- sezon 2022/2023 (PII): OHD – 13 września 2022 r., DH – 27 września 2022 r.
- sezon 2023/2024 (PII): OHD – 12 września 2023 r., DH – 26 września 2023 r.

Zastosowano cztery warianty traktowania preparatami zawierającymi 1-MCP:

1. kontrola – bez zastosowania 1-MCP,
2. Harvista™ – zabieg 1-MCP przed zbiorem ($150 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$, 7 dni przed OHD),
3. SmartFresh™ – zabieg 1-MCP po zbiorze ($0,65 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 7 dni po zbiorze),
4. Harvista™ + SmartFresh™ – łączone zastosowanie 1-MCP przed i po zbiorze.

Owoce przechowywano w temperaturze 1°C i przy wilgotności względnej około 95%. W sezonie 2021/2022 jabłka przechowywano w warunkach zbliżonych do DKA ($0,6\% \text{ CO}_2$ i $0,6\% \text{ O}_2$) – **PI**. W sezonach 2022/2023 oraz 2023/2024 zastosowano dwie technologie przechowalnicze:

- ULO (Ultra Low Oxygen) – $1,2\% \text{ CO}_2$ i $1,2\% \text{ O}_2$,
- w warunkach zbliżonych do DKA (Dynamic Controlled Atmosphere) – $0,6\% \text{ CO}_2$ i $0,6\% \text{ O}_2$.

Takie podejście umożliwiło porównanie efektywności obu technologii w kontekście długotrwałego przechowywania owoców (**PII**).

Długość przechowywania wynosiła 9 miesięcy w badaniach opisanych w **PI** oraz 5, 7 lub 9 miesięcy w badaniach z **PII**, przy czym ocenę jakości jabłek przeprowadzano zarówno bezpośrednio po zakończeniu przechowywania, jak i po 7-dniowym okresie symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 20°C , zgodnie z metodyką opisaną w obu publikacjach.

Układ doświadczenia w sezonach 2022/2023 i 2023/2024 obejmował następujące czynniki:

- zastosowanie 1-MCP przed zbiorem (Harvista™: tak/nie),
- termin zbioru (OHD/DH),
- zastosowanie 1-MCP po zbiorze (SmartFresh™: tak/nie),
- technologia przechowywania (ULO/DKA),
- długość przechowywania (5, 7, 9 miesięcy),
- długość symulowanego obrotu detalicznego (0 lub 7 dni).

W każdym sezonie uzyskano 96 grup doświadczalnych obejmujących wszystkie możliwe kombinacje badanych czynników, co w całym dwuletnim cyklu badawczym

odpowiadało 192 grupom. Dla każdej kombinacji jakość jabłek oceniano w czterech powtórzeniach, przy czym każde powtórzenie obejmowało 10 owoców.

4.A.2. Oznaczane parametry jakości owoców

Zakres oznaczeń w niniejszym opracowaniu został przedstawiony zgodnie z podejściem zastosowanym w **Publikacji I (PI)**, gdzie kluczowe było określenie terminu zbioru oraz monitorowanie zmian jakości owoców podczas przechowywania i po symulowanym obrocie detalicznym, oraz w **Publikacji II (PII)**, w której wybrane parametry jakości wykorzystano jako zmienne zależne w modelach regresyjnych opisujących wpływ czynników pogodowych, agrotechnicznych i przechowalniczych (**kody zamieszczone w tabeli 1 w PII**), dzięki czemu oznaczane cechy obejmowały zarówno parametry służące do określenia dojrzałości zbiorczej, jak i zestaw wskaźników jakościowych uwzględnianych w analizach statystycznych i modelowaniu.

W ramach badań opisanych w PI i PII oznaczano następujące wskaźniki: indeks Streifa (IS), jędrność miąższu (F), zawartość ekstraktu (SSC, °Bx), kwasowość miareczkową (TA, % kwasu jabłkowego), stosunek SSC/TA, wynik testu skrobiowego (skala 1–10), stężenie etylenu w komorach nasiennych ($\mu\text{L/L}$), intensywność wydzielania etylenu ($\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), parametry barwy rumieńca w układzie CIE Lab (L, a*, b*) oraz zawartość kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowego (ACC) (PII).

Indeks Streifa (PI)

Optymalny termin zbioru jabłek określano na podstawie Indeksu Streifa (IS), obliczanego z wykorzystaniem jędrności miąższu (F), zawartości ekstraktu (R) oraz wyniku testu skrobiowego (S) zgodnie z równaniem (1):

$$IS = \frac{F}{R \cdot S} \quad (1)$$

gdzie: IS – Indeks Streifa, F – jędrność miąższu, R – zawartość ekstraktu (SSC), S – wynik testu skrobiowego (skala 1–10).

W okresie przedzbiorczym pomiary przeprowadzano trzykrotnie w odstępach pięciodniowych, w celu uchwycenia dynamiki dojrzewania owoców i określenia optymalnego terminu zbioru. W dniu zbioru ponownie oznaczano jędrność miąższu (F) oraz zawartość ekstraktu (SSC) i wykonywano test skrobiowy, traktując uzyskane wartości jako punkt odniesienia przy interpretacji zmian jakościowych zachodzących podczas przechowywania.

Test skrobiowy – PI

Test skrobiowy przeprowadzano na poprzecznych przekrojach owoców po spryskaniu roztworem jodu w jodku potasu (I_2 w KI). Uzyskane zabarwienie miąższu porównywano z tablicą wzorcową i przypisywano wartości w skali 1–10. Wyniki każdego powtórzenia uśredniano, a otrzymana wartość służyła do oceny stopnia hydrolizy skrobi. W połączeniu z pomiarami jędrności miąższu (F) oraz zawartości ekstraktu (SSC) stanowiła ona podstawę wyznaczania wartości Indeksu Streifa.

Jędrność miąższu – F (PI, PII)

Jędrność miąższu (F) stanowiła podstawowy wskaźnik oceny zmian jakościowych zachodzących podczas przechowywania oraz po symulowanym obrocie detalicznym (shelf-life) (PI), a jednocześnie była jedną z głównych zmiennych zależnych w analizach regresji (PII). Pomiar wykonywano po usunięciu skórki, w dwóch naprzeciwległych punktach każdego owocu (dwa pomiary na owoc). Jędrność określano przy użyciu jędrnościomierza Instron 5542, wyposażonego w metalowy trzpień o średnicy 11 mm i ustawionym na prędkość pomiaru 4 mm/s. Wyniki podawano w niutonach (N)

Zawartość ekstraktu – SSC (PI, PII)

Zawartość ekstraktu (SSC, °Bx) oznaczano refraktometrycznie po wyciśnięciu soku z wycinków miąższu ze skórką pobranych z każdego owocu, po wcześniejszym pomiarze jędrności. W pracy SSC pełniło podwójną funkcję: współtworzyło Indeks Streifa, wykorzystywany do oceny dojrzałości zbiorczej jabłek (PI), oraz stanowiło zmienną zależną w modelach statystycznych (PII), umożliwiając ocenę wpływu warunków atmosferycznych, zastosowania 1-MCP, technologii przechowywania oraz długości przechowywania i symulowanego obrotu detalicznego (shelf-life) na parametry jakościowe jabłek.

Kwasowość miareczkowa – TA oraz wskaźnik pochodne (PI, PII)

Kwasowość jabłek (TA) oznaczano metodą miareczkowania roztworu soku i wody destylowanej 0,1 M NaOH do pH 8,1 przy użyciu automatycznego titratora (TitroLine 5000). Wyniki przeliczano na zawartość kwasu jabłkowego i wyrażano w %. TA stanowiła zarówno jeden z parametrów jakości ocenianych po przechowywaniu (PI), jak i zmienną zależną w analizach regresyjnych (PII). Dla pełniejszej charakterystyki profilu smakowego jabłek uwzględniano również stosunek SSC/TA, stanowiący syntetyczną miarę równowagi cukrowo-kwasowej, wykorzystywaną w PII jako odrębna

zmienna zależna, umożliwiającą porównywanie względnych zmian „słodkości” i „kwasowości” w odpowiedzi na analizowane czynniki.

Parametry związane z etylenem – stężenie etylenu w komorach nasiennych oraz intensywność wydzielania etylenu (PI)

W celu oceny aktywności fizjologicznej owoców oznaczano stężenie etylenu w komorach nasiennych oraz intensywność jego wydzielania w warunkach standardowych (20°C). Stężenie etylenu w komorach nasiennych określano poprzez pobranie 1 mL powietrza strzykawką i analizę metodą chromatografii gazowej (HP 5890), a wyniki wyrażano w $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$. Intensywność wydzielania etylenu mierzono na pojedynczych owocach umieszczonych w szczelnie zamykanych słojach o pojemności 1500 mL w temperaturze 20°C; po 1 h pobierano 1 mL powietrza do analizy chromatograficznej, a wyniki wyrażano w $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. Oznaczone parametry umożliwiały interpretację tempa dojrzewania oraz zmian jakościowych po przechowywaniu, w tym określenie „wrażliwości” jabłek na warunki występujące w czasie obrotu.

Zawartość ACC – kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowego (PII)

W pracy uwzględniono również zawartość kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowego (ACC), będącego prekursorem etylenu w szlaku jego biosyntezy. Parametr ten analizowano w PII jako zmienną zależną w modelach regresyjnych, ponieważ umożliwia bardziej mechanistyczną interpretację zmian jakości owoców, szczególnie w kontekście czynników ograniczających lub modyfikujących dojrzewanie zależne od etylenu (np. termin zbioru, zastosowanie 1-MCP przed- i/lub pozbiorniczo, technologia przechowywania, długość przechowywania oraz shelf-life).

Uwzględnienie ACC pozwala powiązać zmiany parametrów jakościowych (F, SSC, TA i SSC/TA) z potencjalnymi różnicami w intensywności procesów biosyntezy etylenu, co umożliwia lepsze wyjaśnienie obserwowanej zmienności jakości owoców w warunkach przechowalniczych.

Barwa rumieńca – pomiary w układzie CIE $L^*a^*b^*$ (PI)

Cechy wizualne oceniano poprzez pomiar barwy rumieńca w systemie CIE Lab przy użyciu kolorymetru Minolta CM 508i. Rejestrowano parametry L^* (jasność), a^* (oś zielony–czerwony) oraz b^* (oś niebieski–żółty). Pomiary wykonywano od strony rumieńca owoców po uprzedniej kalibracji urządzenia. Zmienna ta stanowiła istotny

element oceny jakości handlowej i wizualnej owoców oraz wspierała interpretację wpływu terminu zbioru i warunków przechowywania na cechy zewnętrzne.

4.A.3. Analiza statystyczna

Analizę statystyczną przeprowadzono w sposób spójny z podejściami zastosowanymi w publikacjach **PI** i **PII** – odpowiednio: porównywaniem grup (**PI**) oraz modelowaniem wpływu wielu czynników na cechy jakościowe (**PII**). Poziom istotności przyjęto na $p < 0,05$.

4.A.3.1. Publikacja I (PI)

Normalność rozkładu wyników weryfikowano testem Shapiro–Wilka. W zależności od spełnienia założeń stosowano:

- ANOVA jednoczynnikową z testem post hoc Newmana-Keulsa (dla rozkładu normalnego) lub
- testy nieparametryczne: U Manna-Whitneya (dwie grupy) oraz Kruskala-Wallisa (więcej niż dwie grupy).
- Analizy wykonano w programie Statistica 13.3.

4.A.3.2. Publikacja II (PII)

W celu oceny wpływu warunków atmosferycznych, zabiegów 1-MCP, terminu zbioru oraz technologii i długości przechowywania zastosowano wielokrotną regresję krokową z procedurą eliminacji wstecznej. Raportowano współczynniki regresji, w tym β , wraz z wartościami p , natomiast siłę wpływu poszczególnych predyktorów oceniano na podstawie cząstkowego η^2 . Analizy statystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem programów Statistica 13.3 oraz IBM SPSS 26.

5.A. Najważniejsze wyniki

Dane atmosferyczne (PII)

Warunki atmosferyczne w sezonach wegetacyjnych 2022 i 2023, bazujące na danych ze stacji meteorologicznej w Wilanowie (Warszawa), wykazywały znaczne różnice wpływające na dojrzewanie jabłek. Rok 2022 charakteryzował się wyraźnym maksimum opadów w czerwcu (ponad 120 mm) oraz niedoborem opadów w okresie lipiec – wrzesień, przy czym we wrześniu liczba dni z temperaturą $<15^{\circ}\text{C}$ wynosiła 13 przy zbiorze optymalnym i 25 przy zbiorze opóźnionym; w całym okresie kwiecień – wrzesień odnotowano 22 dni z opadem >6 mm. Sezon 2023 był generalnie cieplejszy i suchszy – nadmiar opadów wystąpił jedynie w kwietniu, a od maja do września

dominował niedobór opadów; liczba chłodnych dni we wrześniu była minimalna (1-3 dni $<15^{\circ}\text{C}$ w zależności od terminu zbioru jabłek), a dni z opadem >6 mm było mniej niż w 2022 roku. Takie warunki sugerowały zwiększone ryzyko stresu wodnego i przyspieszonego dojrzewania jabłek w sezonie 2023, co mogło wpływać na parametry jakościowe po przechowywaniu (PII).

Stan dojrzałości w czasie zbioru i znaczenie terminu zbioru (PI)

Wyniki przedstawione w PI wykazały, że owoce zebrane w pierwszym terminie znajdowały się praktycznie tuż przed osiągnięciem optymalnej dojrzałości zbiorczej z przeznaczeniem do długotrwałego przechowywania. Zgodnie z danymi literaturowymi owoce odmiany 'Gala' osiągają dojrzałość zbiorczą przy wartości testu skrobiowego w zakresie 4–6 oraz Indeksu Streifa 0,14–0,20. Owoce zebrane dwa tygodnie później charakteryzowały się wyraźnie bardziej zaawansowaną dojrzałością (m.in. bardzo wysoki indeks skrobiowy w kombinacji kontrolnej), co wskazywało na mniej korzystny ich stan fizjologiczny na początku przechowywania. Istotnym wyjątkiem było stwierdzenie, że w terminie opóźnionym owoce z kombinacji Harvista™ wykazywały niskie stężenie etylenu w komorach nasiennych ($<0,5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$), co sugerowało hamujący wpływ tego preparatu na produkcję etylenu przed zbiorem, jednak efekt ten nie zawsze przekładał się na utrzymanie oczekiwanej jakości po przechowywaniu.

Etylen i skuteczność 1-MCP – (PI i PII)

Wyniki PI wykazały, że pozbiórcze zastosowanie 1-MCP (SmartFresh™), zarówno samodzielnie, jak i po wcześniejszym zastosowaniu Harvista™, utrzymywało bardzo niską produkcję etylenu przez jabłka po 5, 7 i 9 miesiącach przechowywania, niezależnie od terminu zbioru. Przedzbiórcze zastosowanie Harvista™ ograniczało emisję etylenu przede wszystkim przy zbiorze w optymalnym terminie, natomiast efekt ten był słabszy lub zanikał przy zbiorze opóźnionym. Analizy PII wykazały, że czynniki okołozbiórcze, w szczególności pozbiórcze stosowanie 1-MCP, dominowały w wyjaśnianiu zmienności cech jakościowych silnie powiązanych z etylenem, takich jak jędrność, TA i ACC. Ponadto wraz z wydłużaniem przechowywania i okresu shelf-life wzrastała „wewnętrzna presja owoców na dojrzewanie” (m.in. ACC), przy czym pozbiórcze stosowanie 1-MCP pozostawało najskuteczniejszym narzędziem hamującym te procesy.

Jędrność miąższu – (PI i PII)

Wyniki przedstawione w PI dotyczące jędrności miąższu wykazały, że po przechowywaniu owoce zebrane w terminie optymalnym utrzymywały zazwyczaj wyższą jędrność niż owoce zebrane w terminie opóźnionym. Za akceptowalny próg jakościowy jabłek po shelf-life przyjęto wartość minimalną jędrności miąższu równą 55 N. Po 7-dniowej ekspozycji w temperaturze 20°C owoce zebrane w terminie optymalnym w wielu kombinacjach z zastosowaniem 1-MCP zachowywały jędrność powyżej tego progu. Istotnym spostrzeżeniem było również to, że przedzbiorecze zastosowanie Harvista™ w sadzie umożliwiała utrzymanie jędrności miąższu >55 N nawet po 9 miesiącach przechowywania, jednak jedynie w przypadku owoców zebranych w optymalnym terminie. W przypadku zbioru opóźnionego efekt preparatu Harvista™ okazał się niewystarczający – utrzymanie jędrności powyżej 55 N zapewniało dopiero pozbiorecze zastosowanie 1-MCP (SmartFresh™), niezależnie od wcześniejszego stosowania Harvista™.

Analiza modelowa przedstawiona w PII wykazała, że pozbiorecze zastosowanie 1-MCP wywierało najsilniejszy efekt utrzymania wysokiej jędrności miąższu, przedzbiorecze zastosowanie 1-MCP działało słabiej, natomiast czynniki obniżające jędrność obejmowały opóźniony termin zbioru, wydłużony shelf-life oraz, w mniejszym stopniu, długość przechowywania, przy czym dodatkowo warunki atmosferyczne końcowego okresu wegetacji (liczba dni chłodnych we wrześniu i dni z opadem >6 mm) modulowały potencjał zachowania wysokiej jędrności przez jabłka po długotrwałym przechowywaniu.

Kwasowość miareczkowa (TA) i konsekwencje dla smaku (PI i PII)

Wyniki analiz kwasowości miareczkowej (TA) jabłek przedstawione w PI wykazały, że wartość tego wskaźnika ulegała spadkowi w trakcie przechowywania, przy czym kombinacje obejmujące zastosowanie 1-MCP częściej sprzyjały utrzymaniu wyższych wartości kwasowości w porównaniu z kontrolą. Przedzbiorecze stosowanie preparatu Harvista™ „solo” zazwyczaj skutkowało wartościami TA zbliżonymi do kontroli, natomiast największą skuteczność w ograniczaniu spadku kwasowości odnotowano w wariancie sekwencyjnym Harvista™ + SmartFresh™, szczególnie po dłuższym okresie przechowywania oraz po ekspozycji shelf-life. Wpływ terminu zbioru jabłek na TA był obserwowany sporadycznie i nie zawsze wykazywał jednoznaczną tendencję.

Wyniki analizy modelowej zamieszczone w PII wykazały, że zmiany kwasowości miareczkowej (TA) jabłek były w największym stopniu determinowane przez czynniki pozbiorcze, przy czym kluczową rolę odgrywało zastosowanie 1-MCP po zbiorze, które najskuteczniej spowalniało zużycie kwasów organicznych. Opóźniony termin zbioru, wydłużony czas przechowywania oraz okres shelf-life działały natomiast w kierunku obniżenia TA. Zmienne atmosferyczne nie wchodziły do finalnego modelu, wskazując, że w badanym układzie decydujące znaczenie dla utrzymania kwasowości miały decyzje dotyczące terminu zbioru i warunków przechowywania.

Zawartość ekstraktu (SSC) – (PI i PII)

Wyniki dotyczące zawartości ekstraktu (SSC), przedstawione w PI, wskazują, że cecha ta była w stosunkowo niewielkim stopniu uzależniona od terminu zbioru, gdyż w większości analizowanych przypadków nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic. Zmienność wartości SSC była natomiast determinowana przez zastosowaną kombinację z 1-MCP, szczególnie w odniesieniu do owoców zbieranych w opóźnionym terminie i ocenianych po 7 oraz 9 miesiącach przechowywania. Ogólnie najwyższe wartości SSC najczęściej odnotowywano w jabłkach poddanych działaniu preparatu SmartFresh™, natomiast najniższe wartości tej cechy zazwyczaj występowały w owocach traktowanych preparatem Harvista™.

Ujęcie modelowe zaprezentowane w PII potwierdziło, że zawartość ekstraktu (SSC) była w mniejszym stopniu determinowana przez analizowane predyktory w porównaniu z jędrnością miąższu oraz kwasowością miareczkową (TA). Na kształtowanie wartości SSC w największym stopniu wpływały czynniki o charakterze technologicznym. Analiza regresji wykazała, że zastosowanie 1-MCP przed zbiorem skutkowało obniżeniem wartości tej cechy, natomiast aplikacja 1-MCP po zbiorze była związana ze wzrostem wartości analizowanego parametru. Jednocześnie opóźnienie terminu zbioru oraz wydłużenie okresu przechowywania sprzyjały obniżeniu SSC, podczas gdy warunki panujące w okresie obrotu towarowego (shelf-life) powodowały jego nieznaczny wzrost, prawdopodobnie na skutek efektu zagęszczenia wynikającego ze zwiększonej transpiracji owoców. Model przedstawiony w PII nie uwzględniał zmiennych opisujących warunki atmosferyczne dla tej cechy, co wskazuje, że w badanym układzie doświadczalnym kluczowe znaczenie w kształtowaniu wartości SSC miały decyzje technologiczne oraz przebieg przechowywania, a nie warunki pogodowe występujące w okresie przedzbiorkowym.

Wskaźnik SSC/TA – równowaga smakowa (PI i PII)

W pracy **PII** wskaźnik SSC/TA odzwierciedlał zintegrowane zmiany obu parametrów zachodzące w trakcie posprzętowego dojrzewania owoców, z uwzględnieniem wpływu zróżnicowanej intensywności produkcji etylenu. Wartość tego wyróżnika wzrastała pod wpływem późniejszego terminu zbioru, wydłużenia okresu przechowywania oraz w warunkach obrotu towarowego (shelf-life), co wskazuje na narastanie komponentu tzw. dojrzałości sensorycznej. Zjawisko to wynikało przede wszystkim z obniżenia kwasowości miareczkowej (TA) przy relatywnie niewielkich zmianach zawartości ekstraktu (SSC), przy czym to spadek TA stanowił główny czynnik determinujący wzrost wartości wskaźnika SSC/TA.

Jednocześnie zastosowanie 1-MCP po zbiorze skutkowało wolniejszym tempem wzrostu wartości SSC/TA, co pozostaje zgodne z mechanizmem działania tego związku. Poprzez hamowanie percepcji etylenu w tkankach ograniczana jest intensywność procesów katabolicznych, w tym zużycie kwasów organicznych, co skutkuje mniejszym spadkiem wartości TA i w konsekwencji ogranicza wzrost proporcji SSC/TA. W pracy **PI** zależność ta znalazła pośrednie odzwierciedlenie w wynikach, ponieważ kombinacje obejmujące zastosowanie 1-MCP, szczególnie w formie zabiegu pozbiorczego, częściej charakteryzowały się wyższą wartością TA przy relatywnie niewielkich zmianach SSC, co przekładało się na niższy lub wolniej zwiększający się wskaźnik SSC/TA.

ACC – (PII)

Kwas ACC, jako bezpośredni prekursor etylenu, umożliwia powiązanie zmian jakości jabłek z dynamiką dojrzewania regulowaną etylenem. W pracy **PII** zawartość kwasu ACC wzrastała wraz z wydłużaniem okresu przechowywania, w czasie shelf-life oraz w owocach z późniejszego terminu zbioru, wykazując dodatkowo zróżnicowanie w zależności od zastosowanej technologii przechowywania. Model regresji wykazał, że jedynym czynnikiem jednoznacznie ograniczającym zawartość kwasu ACC było pozbiorcze zastosowanie 1-MCP, co wskazuje, że blokowanie odpowiedzi na etylen stanowi dominujący mechanizm stabilizacji jakości owoców i opóźnia wzrost tzw. „presji dojrzewania” w warunkach długotrwałego przechowywania.

6.A. Dyskusja

W powyższej części pracy wykazano, że jakość pozbioreza jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w największym stopniu zależy od decyzji technologicznych podejmowanych po zbiorze, przede wszystkim od strategii stosowania 1-MCP, oraz od stanu

fizjologicznego owoców w czasie zbioru. Wykazano istotny wpływ zarówno zastosowania 1-MCP przed zbiorem (Harvista™), jak i po zbiorze (SmartFresh™), a także terminu zbioru na parametry jakości jabłek po 5, 7 i 9 miesiącach przechowywania w warunkach quasi-DKA. Ocena jakości owoców obejmowała intensywność wydzielania etylenu, jędrność miąższu oraz zawartość ekstraktu (SSC) i kwasowość miareczkową (TA).

Uzyskane wyniki są zgodne z klimakterycznym typem dojrzewania jabłek, w którym etylen pełni kluczową rolę w regulacji procesów dojrzewania, natomiast mechanizmy starzenia po zbiorze przyczyniają się do stopniowego pogorszenia jakości owoców (Satekge i Magwaza, 2022). Zastosowanie 1-MCP oraz przechowywanie w atmosferach niskotlenowych ma na celu ograniczenie aktywności etylenu, choć niektórzy autorzy zwracają uwagę na potencjalne koszty takiego podejścia, w tym obniżenie oceny sensorycznej owoców, przede wszystkim w wyniku ograniczenia produkcji związków aromatycznych (Kondo i in., 2005; Lysiak i in., 2021). W tym kontekście kluczowe pozostaje wyważenie stabilizacji parametrów jakości ocenianych instrumentalnie z wymaganiami jakościowymi stawianymi przez konsumentów.

Najbardziej wyraźny wpływ ocenianych czynników w doświadczeniu dotyczył jędrności, uznawanej za jeden z kluczowych wyznaczników jakości jabłek w ocenie konsumentów (Wong i in., 2020). Dla grupy odmian twardych preferowana jest wartość jędrności miąższu powyżej 55 N (Hoehn i in., 2003a; Hoehn i in., 2003b), co odnosi się również do jabłek 'Gala Schniga'. W badaniach owoce traktowane 1-MCP przed i/lub po zbiorze utrzymywały wyższą jędrność w porównaniu z kombinacją bez zastosowania tego związku, przy czym skuteczność 1-MCP była silnie zależna od terminu zbioru owoców.

Zastosowanie preparatu Harvista™ w sadzie umożliwiło utrzymanie jędrności miąższu powyżej 55 N po 9 miesiącach przechowywania i w okresie shelf-life jedynie w przypadku zbioru jabłek w optymalnym terminie (OHD). Przy zbiorze opóźnionym (DH) efekt ten był niezadawalający już po 5 miesiącach przechowywania. W wariancie DH kluczowe okazało się zastosowanie 1-MCP po zbiorze – niezależnie od wcześniejszego użycia preparatu Harvista™ – co pozwalało utrzymać jędrność powyżej 55 N zarówno po 9 miesiącach przechowywania, jak i po 7 dniach przetrzymywania w temperaturze 20°C. Zależność ta potwierdza, że skuteczność 1-MCP jest ściśle powiązana ze stanem fizjologicznym jabłek w czasie zbioru oraz ich potencjałem przechowalniczym, a jej efekt może wykazywać zróżnicowanie

odmianowe i lokalizacyjne (Baswal i Ramezani, 2020; Tomala i in., 2020a; Tomala i in., 2022).

Zależności te są zgodne z obserwacjami, że wzrost produkcji etylenu przyspiesza utratę jędrności owoców (Both i in., 2017), podczas gdy 1-MCP ogranicza tempo tych zmian (Watkins, 2006; Watkins i Nock, 2012). W opisywanym doświadczeniu jabłka z kombinacji obejmujących 1-MCP wykazywały niską produkcję etylenu podczas 7-dniowego przetrzymywania w temperaturze 20°C, nawet po 9 miesiącach przechowywania w warunkach quasi-DKA, co wiązało się z utrzymaniem wysokiej jędrności miąższu. Wyniki te potwierdzają kluczową rolę etylenu w regulacji procesów dojrzewania i starzenia owoców (Hu i in., 2019) oraz uzasadniają stosowanie 1-MCP zarówno w sadzie (Tomala i in., 2020a; Tomala i in., 2020b), jak i po zbiorze (Tomala i in., 2020c). Obserwacje te są również zgodne z doniesieniami dotyczącymi skuteczności 1-MCP w ograniczaniu produkcji etylenu w warunkach KA/DKA (Bekele i in., 2015; Weber i in., 2017) oraz po przeniesieniu owoców do temperatury pokojowej (Gwanpua i in., 2017a; Gwanpua i in., 2017b).

Spowolnienie procesów zależnych od etylenu w jabłkach traktowanych 1-MCP nie oznaczało całkowitego zatrzymania dojrzewania, co jest zgodne z wcześniejszymi obserwacjami dotyczącymi zmian jakościowych zachodzących w czasie przechowywania owoców mimo stosowania tego związku (Thammawong i Arakawa, 2007; Wawrzyńczak i in., 2008; Błaszczuk i Gasparski, 2019). W badaniach niniejszych jabłka z zastosowaniem 1-MCP utrzymywały wyższą kwasowość miareczkową (TA) w porównaniu z owocami kontrolnymi, szczególnie po 9 miesiącach przechowywania i 7 dniach w okresie shelf-life, co odzwierciedla wolniejsze tempo dojrzewania i ograniczone zużycie kwasów organicznych. Wpływ 1-MCP na zawartość ekstraktu (SSC) był natomiast ograniczony, zgodnie z wcześniejszymi doniesieniami wskazującymi na niewielki efekt pozbiorecznego stosowania tego związku na cukry rozpuszczalne (DeEll i Ehsani-Moghaddam, 2010; DeEll i Lum, 2017). Utrzymanie wyższych wartości TA i SSC sprzyja akceptacji konsumenckiej, ponieważ część odbiorców wiąże te parametry z intensywnym smakiem i postrzeganym „zdrowotnym” charakterem owoców, co wskazuje, że 1-MCP pozwala jednocześnie stabilizować kluczowe wskaźniki jakości sensorycznej przy opóźnieniu niekorzystnego ich „przejrzewania” (Jha i in., 2011).

Analiza regresji oraz ocena siły efektu potwierdziły dominujące znaczenie zastosowania 1-MCP po zbiorze (SmartFresh™) jako pojedynczego czynnika

stabilizującego jakość jabłek. W przypadku jędrności miąższu użycie tego związku wyjaśniało 70,4% jej zmienności (η^2), dla TA – 38,0%, a dla kwasu ACC – 21,3%, co potwierdza wysoką skuteczność 1-MCP w ograniczaniu działania etylenu (Wang i in., 2020; Małachowska i Tomala, 2022; Małachowska i Tomala, 2023). Istotny wpływ na jędrność wykazywały także termin zbioru ($\eta^2 = 47,8\%$) oraz długość shelf-life ($\eta^2 = 23,1\%$), a obserwowany wzrost zawartości kwasu ACC przy późniejszym zbiorze wskazuje na narastanie aktywności szlaku biosyntezy etylenu w miarę postępu dojrzewania. Preparat Harvista™ wywierał wpływ istotny, lecz wyraźnie słabszy ($\eta^2 = 15,9\%$); jednoczesne zastosowanie zabiegu przed- i pozbiorczego może jednak stanowić rozwiązanie korzystne dla partii jabłek kierowanych na wymagające rynki (Péneau i in., 2006; Shin i in., 2023).

Dla kwasowości miareczkowej (TA) istotny okazał się również wpływ długości przechowywania ($\eta^2 = 26,8\%$) oraz terminu zbioru ($\eta^2 = 26,6\%$), podczas gdy wpływ zastosowanej technologii przechowywania był niewielki ($\eta^2 = 3,1\%$) i w analizowanych sezonach nie przekładał się istotnie na jędrność ani zawartość ekstraktu (SSC). W przypadku kwasu ACC technologia przechowywania (ULO vs DKA) wykazywała niewielki, lecz statystycznie istotny wpływ ($\eta^2 = 4,9\%$), natomiast zastosowanie 1-MCP przed zbiorem jabłek nie wywierało znaczącego efektu ($\eta^2 = 0,0\%$; $p = 0,726$). Wynik ten wspiera obserwacje innych autorów dotyczące możliwości regeneracji receptorów etylenu w tkankach owoców (Gasser i Rebeaud, 2015; Sutormina i in., 2021) oraz potwierdza drugorzędne znaczenie składu gazowego atmosfery przechowalniczej wobec stopnia dojrzałości zbiorczej i strategii zarządzania etylenem (Gasser i Rebeaud, 2015; McCormick i Kitemann, 2015; Łysiak i in., 2016; Sidhu i in., 2024).

Wpływ warunków atmosferycznych w końcowym okresie wzrostu jabłek na drzewie był widoczny, szczególnie w kontekście jędrności miąższu, co potwierdza wcześniejsze doniesienia innych badaczy (Lachapelle i in., 2013; Bui i in., 2021; Nguyen i in., 2023; Sharma i in., 2023), i wskazuje na modulujące ich znaczenie w kształtowaniu jakości wyjściowej owoców przeznaczonych do przechowywania.

Część B. Kształtowanie jakości jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ w długotrwałym obrocie towarowym w zależności od długości przechowywania i czasu transportu

4.B. Materiały i metody

4.B.1. Materiał roślinny i układ doświadczenia

Materiał roślinny w **części B** rozprawy doktorskiej stanowiły jabłka odmiany ‘Gala Schniga’ pochodzące z tego samego sadu doświadczalnego SGGW w Warszawie, który opisano w **PI i PII** (lokalizacja, podkładka M.9, system prowadzenia drzew i warunki agrotechniczne). Owoce zbierano w dwóch fazach dojrzałości wyznaczonych na podstawie Indeksu Streifa: w optymalnym terminie zbioru (OHD) oraz w terminie opóźnionym o ok. 14 dni (DH), zgodnie z metodyką przedstawioną w **PI i PII**.

W części B niniejszej rozprawy doktorskiej badania ukierunkowano na ocenę trwałości jakości jabłek w warunkach odzwierciedlających łańcuch eksportowy do krajów o gorącym klimacie (symulacja transportu długodystansowego oraz wydłużony obrót detaliczny do 14 dni w temperaturze 25°C), zamiast wyłącznie monitorowania zmian jakości podczas przechowywania i 7-dniowego shelf-life w temperaturze 20°C.

Publikacja III (sezon 2021/2022) – układ doświadczenia i grupy doświadczalne

W opublikowanej pracy **PIII** badania przeprowadzono w sezonie 2021/2022 na owocach zebranych w dwóch terminach: OHD – 9 września 2021 r. oraz DH – 23 września 2021 r. Układ czynnikowy obejmował dwa terminy zbioru (OHD i DH) oraz cztery warianty traktowania 1-MCP: kontrolę (bez 1-MCP), zabieg przedzbiorczy preparatem Harvista™, zabieg pozbiorczy przy użyciu preparatu SmartFresh™ oraz kombinację obydwu preparatów (Harvista™ + SmartFresh™), co w sumie dało osiem kombinacji doświadczalnych. Schemat ten był analogiczny do zastosowanego w **PI**, z tą różnicą, że w **PIII** uwzględniono etap transportu oraz przyjęto warunki obrotu na rynku docelowym w temperaturze 25°C.

Zabieg przedzbiorczy (Harvista™; 150 g·ha⁻¹) wykonano 7 dni przed OHD, natomiast zabieg pozbiorczy (SmartFresh™; 0,65 μL·L⁻¹) przeprowadzono 7 dni po zbiorze w warunkach standardowych dla aplikacji 1-MCP, zgodnie z opisem w **PI i PII**. W odróżnieniu od **PI**, połowę owoców z każdej kombinacji kierowano bezpośrednio do symulacji transportu, natomiast pozostałe przechowywano przez 9 miesięcy w warunkach ULO (1,2% CO₂ i 1,2% O₂; 1°C; wilgotność względna powietrza ok. 95%).

Zarówno owoce kierowane do transportu bezpośrednio po zbiorze, jak i te po 9 miesiącach przechowywania w ULO, pakowano w kartony typu buszel i poddawano symulowanemu transportowi długodystansowemu trwającemu 6 lub 8 tygodni w temperaturze 1°C w normalnej atmosferze (78% N₂; 21% O₂; 0,04% CO₂). Po zakończeniu transportu owoce przechowywano w temperaturze 25°C, symulując obrót detaliczny w ciepłym klimacie, a oceny jakości przeprowadzano bezpośrednio po transporcie (0 dni) oraz po 7 i 14 dniach. Schemat ten stanowił zasadnicze rozszerzenie ocen w porównaniu z pracą **PI**, w którym stosowano shelf-life 7 dni w temperaturze 20°C.

W części czwartej **PIV** (wyniki nieopublikowane) badania prowadzono w dwóch sezonach przechowalniczych: 2022/2023 i 2023/2024, na owocach pochodzących z tego samego sadu co w **PII**. W obu sezonach brano owoce wyrównane pod względem masy (140–150 g), bez uszkodzeń mechanicznych i objawów chorób. Terminy zbioru były następujące: sezon 2022/2023 – OHD 13 września i DH 27 września; sezon 2023/2024 – OHD 12 września i DH 26 września (zgodnie z **PII**). Cztery kombinacje traktowania jabłek 1-MCP (kontrola, Harvista™, SmartFresh™, Harvista™ + SmartFresh™) oraz sposób stosowania były takie same jak w **PI** i **PII**.

W odróżnieniu od **PII**, gdzie ocenę jakości po przechowywaniu prowadzono bezpośrednio oraz po 7 dniach symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 20°C, w **PIV** układ doświadczenia rozszerzono o etap symulowanego transportu długodystansowego w temperaturze 1°C w normalnej atmosferze oraz o wydłużony obrót detaliczny w temperaturze 25°C, z trzema punktami oceny jakości (0, 7 i 14 dni). W konsekwencji, oprócz czynników wspólnych z **PII** (termin zbioru, sposób stosowania 1-MCP przed i po zbiorze, technologia przechowywania ULO/DKA oraz długość przechowywania 5, 7 i 9 miesięcy), włączono dodatkowy czynnik – długość transportu (4 lub 6 tygodni) – oraz rozszerzono shelf-life do 14 dni.

Uwzględnienie trzech terminów oceny po transporcie (0, 7 i 14 dni) pozwoliło uzyskać 288 grup doświadczalnych w każdym sezonie, co łącznie dało 576 kombinacji analitycznych w dwuletnim cyklu badań. Dla każdej kombinacji oceny przeprowadzono w czterech powtórzeniach po 10 owoców, zgodnie z metodologią stosowaną w **PI** i **PII**.

4.B.2. Oznaczone parametry jakości owoców

Zakres oznaczeń w części **B** obejmował zestaw podstawowych parametrów jakości jabłek oznaczanych w **PI** i **PII**, przy czym sposób ich określania był identyczny

jak w tych publikacjach. W związku z tym w niniejszym podrozdziale przedstawiono go jedynie w skrócie, odsyłając do opisów źródłowych.

W analizach uwzględniano: jędrność miąższu (F), zawartość ekstraktu (SSC, °Bx), kwasowość miareczkową (TA, % kwasu jabłkowego) oraz wskaźnik SSC/TA. Metody oznaczeń F, SSC i TA były zgodne z procedurami przedstawionymi w **PI i PII** (penetrometr Instron 5542; oznaczenia refraktometryczne SSC; miareczkowanie do pH = 8,1 z użyciem titratora TitroLine 5000), a szczegóły aparaturowe i przygotowanie próbek opisano w **PI i PII**.

W publikacji **III** dodatkowo oznaczano stężenie etylenu w komorach nasiennych oraz intensywność jego wydzielania. Metodyka pobierania prób jabłek i oznaczeń chromatografią gazową była zgodna z procedurą przedstawioną w **PI** (sprzęt i sposób przygotowania prób). Natomiast – zgodnie z celem badań w **części B** – rejestrację intensywności wydzielania etylenu prowadzono w warunkach symulowanego obrotu detalicznego w ciepłym klimacie, tj. w temperaturze 25°C, przez 14 dni, zamiast w krótszym schemacie shelf-life stosowanym w **PI**. W **publikacji IV** (wyniki nieopublikowane) uwzględniono również zawartość ACC (kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowego) jako zmienną zależną, przyjmując szczegółową metodykę jego oznaczania zgodnie z opisem w **PII**.

Dla każdej kombinacji czynników doświadczalnych pomiary przeprowadzono w czterech powtórzeniach, po 10 owoców w każdym powtórzeniu, zgodnie z metodologią stosowaną w **PI i PII**. W przypadku oznaczeń intensywności wydzielania etylenu w **publikacji III** liczebność prób była zgodna z protokołem przedstawionym w **PI**.

4.B.3. Zmienne niezależne i struktura układu czynnikowego

Układ doświadczeń w **części B** rozprawy doktorskiej obejmował zarówno czynniki wspólne z **PI i PII**, jak i czynniki specyficzne dla symulacji łańcucha logistycznego. Do elementów wspólnych planu badań zaliczono: termin zbioru (OHD/DH), zastosowanie 1-MCP przed zbiorem (Harvista™: tak/nie), zastosowanie 1-MCP po zbiorze (SmartFresh™: tak/nie), a w badaniach wielosezonowych dodatkowo technologię przechowywania (ULO/DKA) oraz długość przechowywania (5, 7 i 9 miesięcy).

Czynnikami odróżniającymi **część B** od **części A** rozprawy (**PI i PII**) były: czas symulowanego transportu długodystansowego w temperaturze 1°C w normalnej atmosferze (NA) oraz czas symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 25°C (0,

7 i 14 dni). Czynniki te włączono do układu doświadczenia jako elementy równorzędne wobec technologii przechowywania, ponieważ stanowią krytyczne etapy determinujące tempo zmian jakości jabłek po opuszczeniu komory przechowalniczej.

W **publikacji III** (2021/2022) układ doświadczenia miał charakter dwupoziomowy: (i) etap „bezpośrednio po zbiorze” oraz (ii) etap „po 9 miesiącach przechowywania w warunkach ULO”. Dla obu etapów realizowano symulowany transport trwający 6 lub 8 tygodni, a następnie obrót detaliczny w temperaturze 25°C, z oceną jakości w trzech punktach czasowych (0, 7 i 14 dni). Podstawową strukturę czynnikową stanowiły zatem: termin zbioru (2 poziomy), wariant 1-MCP (4 poziomy) oraz czas transportu (2 poziomy).

W **publikacji IV** (2022/2023 i 2023/2024) układ doświadczenia rozszerzono o technologię przechowywania (ULO/DKA) oraz długość przechowywania (5, 7 i 9 miesięcy), a następnie – dla każdej kombinacji – realizowano symulowany transport (4 lub 6 tygodni) i obrót detaliczny w temperaturze 25°C (0, 7 i 14 dni). Taka konstrukcja, poprzez wprowadzenie kolejnych etapów po zakończeniu przechowywania, umożliwiła analizę interakcji pomiędzy dojrzałością zbiorczą, terminem zastosowania 1-MCP, technologią przechowywania oraz obciążeniem logistycznym wynikającym z transportu i ekspozycji na podwyższoną temperaturę.

4.B.4. Kodowanie zmiennych do analiz statystycznych

Kodowanie zmiennych niezależnych w **części B** oparto na podejściu zastosowanym w **PII** (zmiennie binarne i porządkowe), rozszerzając je o predyktory opisujące transport oraz obrót detaliczny w temperaturze 25°C. Na potrzeby modelowania zdefiniowano dziewięć zmiennych niezależnych (X_1 – X_9). Zmienne pogodowe (X_1 – X_2), opisujące warunki w okresie przedzbiorczym, przyjęto zgodnie z metodologią stosowaną w **PII** (liczba dni ze średnią temperaturą <15°C oraz liczba dni z opadami skumulowanymi >6 mm), przy czym ich wartości przypisano odrębnie dla sezonów 2022/2023 i 2023/2024 oraz dla terminów zbioru OHD i DH, zgodnie z zestawieniem tabelarycznym.

Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem (X_3) i po zbiorze (X_5) oraz termin zbioru (X_4) zakodowano binarnie, zgodnie z metodyką przyjętą w **PII** (0 – brak zastosowania/termin optymalny; 1 – zastosowanie/termin opóźniony). Technologię przechowywania (X_6) zakodowano również jako zmienną binarną (ULO = 0; DKA = 1),

natomiast długość przechowywania (X_7) przyjęto jako zmienną porządkową (5, 7, 9 miesięcy).

Czynnik transportu (X_8) wprowadzono jako zmienną liczbową odpowiadającą długości symulowanego transportu w tygodniach (4 lub 6 tygodni w **publikacji IV**). Czas symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 25°C (X_9) zakodowano jako zmienną porządkową: 0 – bezpośrednio po zakończonym transporcie; 1 – po 7 dniach; 2 – po 14 dniach. Takie podejście kodowania umożliwiało jednocześnie uwzględnienie predyktorów o charakterze ciągłym, binarnym i porządkowym w modelach regresji krokowej oraz ilościową ocenę ich względnego wpływu na analizowane parametry jakości.

W **publikacji III**, ze względu na jednosezonowy charakter badań oraz odmienny cel analizy (porównywanie odpowiedzi jakościowych na kombinacje 1-MCP i obciążenie logistyczne), zmienne pogodowe nie były uwzględniane w planie analitycznym. Zmienna „długość symulowanego transportu” przyjmowała poziomy 6 lub 8 tygodni, natomiast czas obrotu detalicznego w temperaturze 25°C – poziomy 0, 7 i 14 dni. Pozostałe czynniki, obejmujące termin zbioru (OHD/DH) oraz wariant 1-MCP, zdefiniowano zgodnie z metodologią przyjętą w **PI i PII**.

W tabeli 1 zestawiono zmienne niezależne, ich warianty oraz przypisane kody numeryczne. Kodowanie opracowano w sposób spójny z **PII**, uzupełniając je o predyktory związane z transportem i czasem obrotu w temperaturze 25°C, co zapewnia porównywalność interpretacyjną modeli oraz umożliwia estymację wielkości efektu (η^2) dla czynników logistycznych.

Tabela 1. Zmienne niezależne uwzględnione w modelach statystycznych, ich warianty oraz przypisane kody numeryczne zastosowane w analizie regresji i obliczeniach wielkości efektu cząstkowego (η^2).

Zmienne niezależne		Kategoria	Kod
Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami (X_1)	2022/2023	OHD	13
		DH	25
	2023/2024	OHD	1
		DH	3
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm (X_2)	2022/2023	OHD	22
		DH	22
	2023/2024	OHD	15
		DH	17
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem (X_3)	nietraktowane 1-MCP		0
	traktowane 1-MCP		1

Termin zbioru (X_4)	optymalny	0
	opóźniony o 2 tygodnie	1
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze (X_5)	nietraktowane 1-MCP	0
	traktowane 1-MCP	1
Technologia przechowywania (X_6)	ULO (Ultra Low Oxygen)	0
	DKA (Dynamic Controlled Atmosphere)	1
Długość przechowywania (X_7)	5 miesięcy	5
	7 miesięcy	7
	9 miesięcy	9
Długość symulowanego transportu (X_8)	4 tygodnie	4
	6 tygodni	6
Długość symulowanego obrotu detalicznego (X_9)	0 dni (bez. po zakończonym transporcie)	0
	7 dni	1
	14 dni	2

4.B.5. Analiza statystyczna

Analizę statystyczną zaplanowano w sposób spójny z podejściami zastosowanymi w **PI** i **PII**. Ze względu na odmienny charakter układu doświadczenia i specyfikę celów badań w **części B** procedury analityczne rozdzielono: dla **publikacji III** przeprowadzono analizę porównawczą odpowiedzi jakościowych na kombinacje 1-MCP, długość symulowanego transportu oraz czas obrotu detalicznego w temperaturze 25°C, natomiast dla **publikacji IV – dane nieopublikowane** – zastosowano modelowanie wieloczynnikowe z kodowaniem zmiennych, analogicznie do podejścia przyjętego w **PII**.

Poziom istotności statystycznej przyjęto na $\alpha = 0,05$. Analizę statystyczną przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Statistica 13.3 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) oraz IBM SPSS, wersja 26 (IBM Corp., Armonk, NY, USA), zgodnie z procedurami opisanymi w **PI** i **PII**.

4.B.5.1. Publikacja III (2021/2022)

W **publikacji III** analizę prowadzono w układzie odpowiadającym konstrukcji doświadczenia, obejmującym dwa terminy zbioru (OHD/DH) oraz cztery kombinacje traktowania 1-MCP, przy uwzględnieniu dwóch długości transportu (6 i 8 tygodni) oraz trzech punktów oceny jakości w warunkach symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 25°C (0, 7 i 14 dni). W celu weryfikacji założeń analizy parametrycznej

normalność rozkładu danych oceniano testem Shapiro-Wilka, zgodnie z procedurą stosowaną w **PI**.

W zależności od spełnienia założeń, do analizy danych stosowano analizę wariancji (ANOVA) z odpowiednim testem post hoc dla porównań średnich przy poziomie istotności $p \leq 0,05$. W przypadku niespełnienia założeń normalności rozkładu wykorzystywano procedury nieparametryczne, zgodnie z podejściem opisanym w **PI**. Tak dobrane metody umożliwiały jednoznaczne porównywanie odpowiedzi jakościowych owoców pomiędzy kombinacjami 1-MCP w warunkach symulowanego transportu oraz ekspozycji na wysoką temperaturę (25°C), zarówno dla owoców kierowanych do transportu bezpośrednio po zbiorze, jak i po 9 miesiącach przechowywania w warunkach ULO.

4.B.5.2. Część IV – wyniki nieopublikowane (2022/2023 i 2023/2024)

W niniejszym opracowaniu, oznaczonym umownie jako **publikacja IV**, zastosowano podejście modelowe analogiczne do **PII**, rozszerzone o predyktory opisujące etapy logistyczne po zakończeniu przechowywania w kontrolowanych warunkach. W celu identyfikacji czynników istotnie wpływających na parametry jakości jabłek wykorzystano wielokrotną regresję krokową z procedurą eliminacji wstecznej. Model początkowy obejmował wszystkie zdefiniowane zmienne niezależne (X_1 – X_9), tj. zmienne pogodowe (X_1 – X_2), zabieg 1-MCP przed zbiorem (X_3), termin zbioru (X_4), zabieg 1-MCP po zbiorze (X_5), technologię przechowywania (X_6), długość przechowywania (X_7), długość symulowanego transportu (X_8) oraz czas symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 25°C (X_9) – zgodnie z kodowaniem przedstawionym w podrozdziale **4.B.4.** oraz w zestawieniu tabelarycznym.

W kolejnych iteracjach z modelu usuwano predyktory o najmniejszej istotności statystycznej, na podstawie wartości p , aż do uzyskania modelu końcowego zawierającego wyłącznie zmienne istotne przy $\alpha = 0,05$. Analizę przeprowadzono oddzielnie dla zmiennych zależnych: jędrności miąższu (F), SSC, TA, wskaźnika SSC/TA oraz zawartości kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowego (ACC). Przedstawiono zarówno współczynniki niestandardyzowane, jak i standaryzowane (β) wraz z wartościami p , co umożliwiało ocenę kierunku i względnej siły wpływu poszczególnych predyktorów na analizowane parametry jakości jabłek.

W celu ilościowej oceny względnej siły oddziaływania poszczególnych czynników obliczano cząstkowe eta kwadrat (η^2), analogicznie do procedury

zastosowanej w **PII**. Miara ta określała procentowy udział wariancji zmiennej zależnej przypisywany danej zmiennej niezależnej przy jednoczesnym kontrolowaniu pozostałych predyktorów w modelu końcowym. Takie podejście umożliwiało bezpośrednie porównanie znaczenia czynników technologicznych (ULO/DKA, 1-MCP, długość przechowywania) z czynnikami logistycznymi charakterystycznymi dla **części B**, tj. długością symulowanego transportu oraz czasem symulowanego obrotu detalicznego w temperaturze 25°C.

Analizy statystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Statistica 13.3 oraz IBM SPSS (w **publikacji IV** – wersja 31), przy zachowaniu jednolitego kryterium istotności ($p < 0,05$) oraz spójnych zasad raportowania wyników, co umożliwia bezpośrednie porównanie rezultatów między sezonami oraz poszczególnymi etapami łańcucha dostaw.

5.B. Wyniki

Najważniejsze wyniki – Publikacja III (PIII)

Stan fizjologiczny owoców w czasie zbioru

W publikacji **PIII** wykazano, że stan fizjologiczny owoców w czasie zbioru różnił się istotnie między terminami, co warunkowało ich dalszą reakcję na transport oraz warunki obrotu detalicznego w temperaturze 25°C. Owoce z opóźnionego terminu zbioru (DH) były wyraźnie bardziej dojrzałe – charakteryzowały się niższą jędrnością miąższu, obniżoną kwasowością miareczkową (TA) i niższą wartością Indeksu Streifa, przy jednocześnie wyższej zawartości ekstraktu (SSC) oraz wyższym wyniku testu skrobiowego w porównaniu z owocami z terminu optymalnego (OHD). Ponadto wykazano, że przedzbiórcze zastosowanie preparatu Harvista™ ograniczało produkcję etylenu już na wstępnym etapie – stężenie etylenu w komorach nasiennych podczas zbioru utrzymywało się poniżej $0,5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ u owoców pochodzących z drzew opryskiwanych preparatem Harvista™, nawet w przypadku DH, w którym jabłka cechowały się bardziej zaawansowaną dojrzałością (**tab. 1, PIII**).

Charakterystyka wydzielania etylenu przez jabłka w odpowiedzi na daleki transport oraz warunki obrotu detalicznego w warunkach temperatury 25°C

Wyniki dotyczące intensywności wydzielania etylenu przez jabłka po symulowanym transporcie bezpośrednio następującym po zbiorze wykazały, że najbardziej skuteczne i jednocześnie najbardziej stabilne ograniczenie procesów dojrzewania uzyskano w wariancie łącznego zastosowania preparatów Harvista™ oraz

SmartFresh™. Po sześciu tygodniach transportu owoce po zastosowaniu tych preparatów utrzymywały bardzo niską intensywność wydzielania etylenu co najmniej do 6. dnia przechowywania w temperaturze 25°C, niezależnie od terminu zbioru, co wskazuje na wyraźne zahamowanie (tzw. „wygaszenie”) reakcji klimakterycznego wydzielania etylenu w początkowej fazie obrotu detalicznego. Zastosowanie wyłącznie preparatu SmartFresh™ również skutecznie ograniczało produkcję etylenu, jednak efekt ten był bardziej powtarzalny w przypadku owoców zbieranych w optymalnym terminie (OHD), natomiast w przypadku zbioru opóźnionego (DH) obserwowano większą zmienność wyników. Owoce z kombinacji Kontrola oraz Harvista™ (bez pozbiorniczego zastosowania 1-MCP) charakteryzowały się natomiast wysoką intensywnością wydzielania etylenu niezależnie od terminu zbioru, co potwierdza ograniczoną możliwość stabilizacji procesów dojrzewania w tych wariantach (**ryc. 1, PIII**).

Wydłużenie okresu transportu z 6 do 8 tygodni nie obniżało skuteczności zastosowanych kombinacji, jednak ujawniało istotny efekt samego czasu transportu, przejawiający się zwiększoną intensywnością wydzielania etylenu w pierwszych dniach przetrzymywania w temperaturze 25°C. Zjawisko to było szczególnie wyraźne w przypadku owoców po zastosowaniu preparatu SmartFresh™, zarówno stosowanego samodzielnie, jak i w połączeniu z Harvista™, i występowało niezależnie od terminu zbioru. Jednocześnie, w ujęciu ogólnym, owoce zbierane w terminie opóźnionym (DH) charakteryzowały się zazwyczaj wyższą intensywnością wydzielania etylenu niż owoce zbierane w terminie optymalnym (OHD), co wskazuje na większą wrażliwość jabłek zbieranych później na stres związany z długotrwałym transportem oraz ekspozycją na podwyższoną temperaturę w warunkach obrotu detalicznego (**ryc. 2, PIII**).

Po 9 miesiącach przechowywania w warunkach ULO reakcja etylenowa jabłek uległa wyraźnemu „spłaszczeniu”, co istotnie zmieniało kontekst interpretacji skuteczności poszczególnych wariantów doświadczalnych. W tym etapie owoce w kombinacji kontrolnej oraz po zastosowaniu preparatu Harvista™ wydzielaly 2–3-krotnie mniej etylenu w porównaniu z jabłkami eksportowanymi bezpośrednio po zbiorze, co wskazuje na ograniczenie potencjału etylenowego w wyniku długotrwałego przechowywania. W tych warunkach najniższą intensywność wydzielania etylenu po 6 tygodniach transportu zapewniał preparat SmartFresh™ stosowany samodzielnie, niezależnie od terminu zbioru, natomiast po 8 tygodniach transportu efekt ten nadal się utrzymywał, choć był wyraźnie słabiej zaznaczony (**ryc. 3-4, PIII**).

Jędrność jako krytyczny wskaźnik jakości handlowej jabłek w trakcie obrotu handlowego w temperaturze 25°C

Wyniki przedstawione w pracy **PIII** dowodzą, że termin zbioru był jednym z kluczowych czynników determinujących jędrność jabłek w łańcuchu eksportowym, zwłaszcza w warunkach długotrwałego transportu i wysokiej temperatury rynku docelowego (**tab. 2–3, PIII**). Owoce pochodzące z opóźnionego zbioru (DH) – niezależnie od wariantu traktowania związkami 1-MCP – po transporcie najczęściej traciły jędrność w większym stopniu niż jabłka zbierane w optymalnym terminie (OHD). Po 6 tygodniach transportu bezpośrednio po zbiorze spadek jędrności w jabłkach z DH był istotny w 22 z 24 porównań, natomiast po 8 tygodniach transportu jabłka z DH zawsze charakteryzowały się niższą jędrnością niż owoce z OHD. Ponadto wykazano, że tempo utraty jędrności w temperaturze 25°C było najwyższe w owocach nietraktowanych związkami 1-MCP, szczególnie w jabłkach z DH, co wskazuje na ograniczoną przydatność tych owoców do długotrwałego eksportu do krajów o wysokiej temperaturze na rynku docelowym (**tab. 2, PIII**).

Z punktu widzenia progu jakości handlowej przyjętego w **PIII** (ok. 55 N) stwierdzono wyraźne zróżnicowanie skuteczności poszczególnych kombinacji badanych w niniejszej pracy (**tab. 2-3, PIII**). Zastosowanie preparatu Harvista™ samodzielnie pozwalało zwykle utrzymać minimalną jędrność na poziomie około 55 N do 14. dnia w temperaturze 25°C, jednak dotyczyło to głównie owoców z OHD, podczas gdy w jabłkach z DH margines bezpieczeństwa był mniejszy (**tab. 2, PIII**). Najbardziej stabilny efekt zapewniało natomiast połączenie przed- i pozbiorniczego zastosowania związku 1-MCP (Harvista™ + SmartFresh™) – w tej kombinacji jędrność owoców w każdym przypadku przekraczała 55 N, niezależnie od terminu zbioru, długości transportu oraz czasu obrotu detalicznego w temperaturze 25°C (**tab. 2, PIII**). Jednocześnie wykazano, że SmartFresh™ (bez względu na współzastosowanie preparatu Harvista™) był szczególnie istotny dla owoców z DH, ponieważ skutecznie ograniczał tempo mięknięcia miąższu w warunkach 25°C (**tab. 2, PIII**).

Po 9 miesiącach przechowywania w warunkach ULO obserwowane zależności uległy wyraźnemu wzmocnieniu, zwiększając ryzyko spadku jędrności jabłek poniżej progu handlowego. W temperaturze 25°C owoce w kombinacji kontrolnej oraz po zastosowaniu preparatu Harvista™ na ogół charakteryzowały się jędrnością poniżej oczekiwanego progu 55 N, niezależnie od terminu zbioru i długości transportu,

co wskazuje na ograniczoną tolerancję jabłek na takie warunki. Utrzymanie pożądanej jędrności po 14 dniach w temperaturze 25°C obserwowano przede wszystkim w jabłkach z OIID traktowanych preparatem SmartFresh™ i transportowanych przez 6 tygodni po przechowywaniu, a także w kombinacji Harvista™ + SmartFresh™ – niezależnie od terminu zbioru – przy czym efekt ten był szczególnie wyraźny w przypadku 6-tygodniowego transportu (**tab. 3, PIII**).

Z drugiej strony, przy krótkotrwałym obrocie detalicznym (7 dni w temperaturze 25°C) wyniki zamieszczone w **PIII** wskazują, że zastosowanie preparatu SmartFresh™ – niezależnie od współzastosowania preparatu Harvista™ – pozwalało na ogół utrzymać jędrność powyżej 55 N, również w przypadku jabłek z DH po 8 tygodniach transportu. W praktyce wskazuje to, że przy długotrwałym transporcie i wysokiej temperaturze rynku docelowego pozbiornicze zastosowanie związku 1-MCP stanowi warunek konieczny dla utrzymania jakości, natomiast łączne użycie preparatu Harvista™ + SmartFresh™ zapewnia najwyższy margines bezpieczeństwa jędrności w całym łańcuchu eksportowym (**tab. 2-3, PIII**).

Zawartość ekstraktu (SSC) w jabłkach – duże zróżnicowanie wartości w badaniach

Rozpatrując zawartość ekstraktu (SSC) w jabłkach opisaną w **PIII**, obserwowano znaczne wahania tej cechy. Różnice wynikające z terminu zbioru (OHD vs DH) były zazwyczaj niewielkie, szczególnie po 8 tygodniach transportu, kiedy SSC w wielu kombinacjach utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Po 6 tygodniach transportu stwierdzono natomiast tendencję do niższych wartości SSC w owocach traktowanych preparatem Harvista™ w porównaniu z jabłkami po zastosowaniu preparatu SmartFresh™, co wskazuje, że w krótszym okresie symulowanego transportu zastosowanie związku 1-MCP wyraźniej różnicowało tę cechę (**tab. 4, PIII**).

Oceniając zmiany SSC podczas przetrzymywania jabłek w temperaturze 25°C, wykazano, że kierunek tych zmian nie był stały, lecz zależał od zastosowanej kombinacji ze związkiem 1-MCP oraz konfiguracji pozostałych czynników. Przykładowo, po 6 tygodniach transportu w kombinacji Harvista™ + SmartFresh™ obserwowano wzrost zawartości ekstraktu (SSC) wraz z wydłużaniem czasu symulowanego obrotu detalicznego, podczas gdy przy stosowaniu tych samych preparatów indywidualnie w niektórych przypadkach notowano zmiany w przeciwnym kierunku. Taki obraz wyników potwierdza, że SSC jest wskaźnikiem zależnym od interakcji między czynnikami logistycznymi (długość transportu, czas obrotu detalicznego w 25°C)

a fizjologicznymi (reakcja na 1-MCP), oraz że wartość tej cechy nie wynika wyłącznie z działania pojedynczego czynnika rozpatrywanego jako efekt główny (**tab. 4, PIII**).

Po 9 miesiącach przechowywania w warunkach ULO fluktuacje SSC utrzymywały się, co wskazuje na trwałość złożonej reakcji tej cechy na układ czynników doświadczenia. Przewaga OHD nad DH była wyraźna głównie w kombinacji kontrolnej po 6 tygodniach transportu, natomiast w pozostałych wariantach wartości SSC pozostawały zbliżone. Po 14 dniach w temperaturze 25°C jabłka z kombinacji obejmujących preparat SmartFresh™ (SmartFresh™ oraz Harvista™ + SmartFresh™) często wykazywały wyższe wartości SSC niż owoce kontrolne i po zastosowaniu preparatu Harvista™, szczególnie po 8 tygodniach transportu (**tab. 5, PIII**).

Kwasowość miareczkowa (TA) – przewaga OHD w eksporcie jabłek bezpośrednio po zbiorze oraz istotna rola 1-MCP po przechowywaniu

Analiza wyników przeprowadzona po zakończeniu symulowanego transportu, realizowanego bezpośrednio po zbiorze, wykazała, że owoce zebrane w terminie optymalnym (OHD) na ogół charakteryzowały się wyższą kwasowością miareczkową (TA) niż owoce zebrane w terminie opóźnionym (DH). Zależność ta była obserwowana niezależnie od zastosowanej kombinacji zabiegów z 1-MCP oraz długości transportu. Wydłużenie transportu z 6 do 8 tygodni ujawniło natomiast wyraźniejsze różnice pomiędzy analizowanymi kombinacjami. Zastosowanie 1-MCP w kombinacjach SmartFresh™ oraz Harvista™ + SmartFresh™ częściej sprzyjało utrzymaniu wyższych wartości TA w porównaniu z próbą kontrolną, podczas gdy w kombinacji kontrolnej oraz w kombinacji Harvista™ wartości tej cechy były zazwyczaj zbliżone. Podobnie jak w przypadku pozostałych wskaźników jakości, istotnym czynnikiem modyfikującym kwasowość jabłek (TA) okazała się długość symulowanego obrotu detalicznego prowadzonego w warunkach temperatury 25°C, która skutkowała stopniowym obniżaniem kwasowości miareczkowej. Tempo tego spadku było uzależnione zarówno od zastosowanej kombinacji zabiegów z 1-MCP, jak i od terminu zbioru owoców (**tab. 6, PIII**).

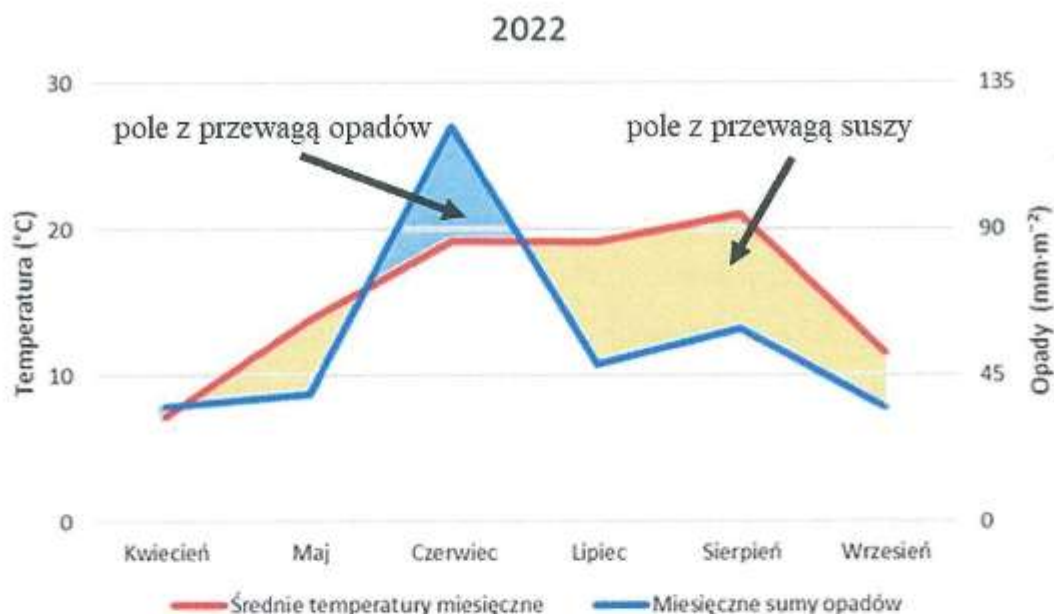
Po 9 miesiącach przechowywania w warunkach ULO różnice w kwasowości miareczkowej (TA) wynikające z terminu zbioru w dużej mierze ulegały zatarciu, natomiast zdecydowanie silniej ujawniał się wpływ zastosowania związku 1-MCP, niezależnie od terminu zbioru oraz długości symulowanego transportu. W analizowanych warunkach zastosowanie preparatu SmartFresh™ niemal we wszystkich przypadkach

zapewniało wyższe wartości TA w porównaniu z kombinacją kontrolną, natomiast skuteczność preparatu Harvista™ była zazwyczaj jedynie nieznacznie mniejsza względem kombinacji z zastosowaniem SmartFresh™. W większości analizowanych kombinacji, po 14 dniach symulowanego obrotu detalicznego prowadzonego w temperaturze 25°C, obserwowano obniżenie wartości TA w porównaniu z wartościami oznaczonymi bezpośrednio po zakończeniu transportu, z nielicznymi wyjątkami wskazanymi w PIII (tab. 7, PIII).

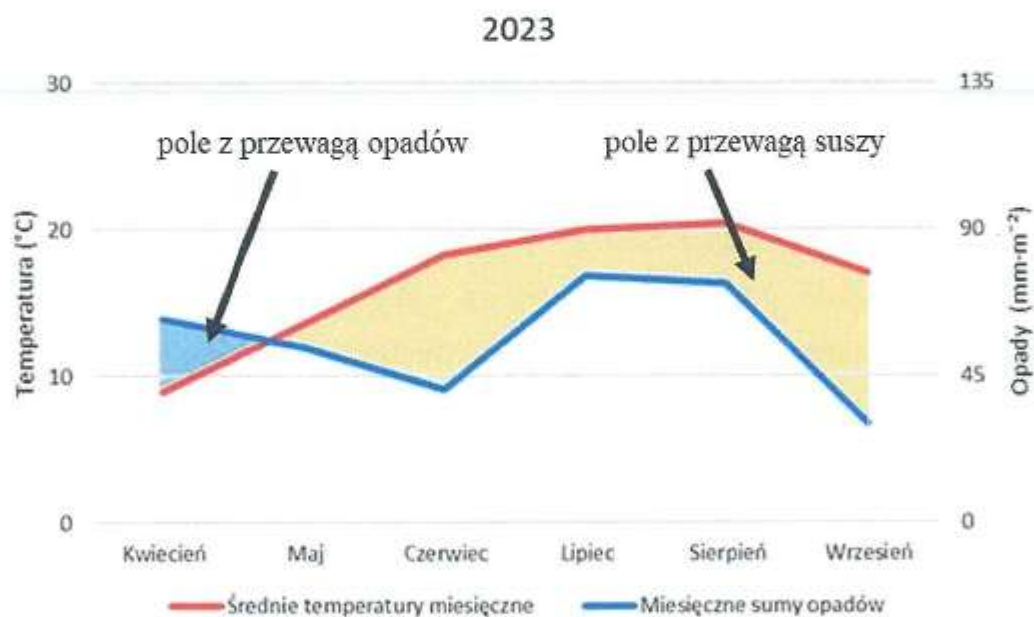
Wyniki z części B (nieopublikowane)

5.B.1. Warunki atmosferyczne w okresach wegetacyjnych w latach 2022-2023

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przebieg średnich miesięcznych temperatur powietrza oraz miesięcznych sum opadów atmosferycznych zarejestrowanych na stacji Warszawa-Wilanów (52°9'36,1" N; 21°5'58,2" E) w okresie od kwietnia do września w latach 2022 i 2023. Dane zaprezentowano w formie klimatogramów sporządzonych według metody Waltera i Lietha (1960), polegającej na jednoczesnym zobrazowaniu przebiegu temperatury i opadów w skali, w której 1°C odpowiada 4,5 mm opadu. Zastosowanie tej metody umożliwia identyfikację miesięcy o przewadze opadów nad temperaturą, interpretowanych jako okresy wilgotne (obszary oznaczone kolorem niebieskim), oraz miesięcy suchych, w których wartości temperatury przewyższają sumy opadów (obszary oznaczone kolorem żółtym). Szczegółową charakterystykę warunków atmosferycznych przedstawiono w PII (część A rozprawy doktorskiej).



Wykres 1. Średnie miesięczne temperatury i sumy opadów w 2022 r. od kwietnia do września dla stacji Wilanów, Warszawa, Polska (N 52°9'36,1", E 21°5'58,2") – PII.



Wykres 2. Średnie miesięczne temperatury i sumy opadów w 2023 r. od kwietnia do września dla stacji Wilanów, Warszawa, Polska (N 52°9'36,1", E 21°5'58,2") – PII.

W tabeli 2 przedstawiono statystyki opisowe parametrów jakościowych jabłek analizowanych w sezonach przechowalniczych 2022/2023 oraz 2023/2024. Łączna liczba 2304 obserwacji zapewniła wysoką reprezentatywność próby oraz wiarygodność uzyskanych wyników. Jędrność miąższu wykazywała szeroki zakres zmienności –

od 28,6 do 81,4 N, przy średniej 53,3 N i odchyleniu standardowym 12,1 N. Wysokie wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,93$; skorygowany $R^2 = 0,86$) wskazały na bardzo dobre dopasowanie modelu opisującego zmienność tej cechy, co sugerowało jej silną zależność od analizowanych czynników.

Kwasowość miareczkowa mieściła się w przedziale od 0,10 do 0,41% kwasu jabłkowego, przy średniej wartości 0,21% i relatywnie niskiej zmienności ($SD = 0,04$). Wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,82$) oraz skorygowanego R^2 (0,68) wskazały na dobry, choć wyraźnie słabszy niż w przypadku jądności, stopień wyjaśnienia obserwowanej zmienności.

Zawartość ekstraktu wynosiła od 10,4 do 15,7°Bx, przy średniej 12,9°Bx. Niewielkie odchylenie standardowe (0,8°Bx) wskazało na stosunkowo jednorodną wartość tej cechy w badanej populacji. W porównaniu z jądnością miąższu, wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,70$) oraz skorygowanego R^2 (0,49) były niższe, co sugerowało ograniczoną skuteczność modelu w opisie zmienności tej cechy.

Wskaźnik SSC/TA wykazywał bardzo szeroki zakres zmienności (33–118), co odzwierciedlało się w wysokim odchyleniu standardowym (12,4). Średnia wartość tego parametru wyniosła 62,6. Relatywnie wysokie wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,78$) oraz skorygowanego R^2 (0,61) wskazały, że zmienność wskaźnika była w znacznym stopniu wyjaśniona przez zastosowany model.

Stężenie ACC charakteryzowało się największą względną zmiennością, przy wartościach w zakresie od 0,001 do 4,22 nmol·kg⁻¹, średniej wynoszącej 0,29 nmol·kg⁻¹ i odchyleniu standardowym 0,32. Niskie wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0,57$) oraz skorygowanego R^2 (0,33) wskazały na relatywnie niewielkie dopasowanie modelu, co sugerowało istotny wpływ czynników losowych lub nieliniowych procesów fizjologicznych związanych z dojrzewaniem i przechowywaniem owoców.

Tabela 2. Statystyki opisowe wyników uzyskanych z analiz jabłek odmiany ‘Gala’ w sezonach przechowalniczych 2022/2023 oraz 2023/2024

Wskaźniki	n	min.	max.	śr.	SD	R ²	skorygowany R ²
Jądność miąższu (N)	2304	28,6	81,4	53,3	12,1	0,93	0,86
Kwasowość miareczkowa (% kw. jabłkowego)		0,10	0,41	0,21	0,04	0,82	0,68
Zawartość ekstraktu (°Bx)		10,4	15,7	12,9	0,8	0,70	0,49
SSC/TA		33,0	118	62,6	12,4	0,78	0,61
ACC (nmol·kg ⁻¹)		0,001	4,22	0,29	0,32	0,57	0,33

* SD – odchylenie standardowe.

5.B.2. Jędrność miąższu (F)

Na podstawie wyników krokowej analizy regresji wielorakiej (tabela 3) stwierdzono, że jędrność jabłek odmiany 'Gala' była istotnie determinowana zarówno przez warunki atmosferyczne w okresie przedzbiorczym, jak i przez czynniki technologiczne związane ze zbiorem oraz długością i sposobem przechowywania ($p < 0,001$ dla wszystkich zmiennych uwzględnionych w modelu).

Najsilniejszy dodatni wpływ na jędrność miąższu wykazało zastosowanie 1-MCP po zbiorze ($\beta = 0,656$), co potwierdziło jego kluczową rolę w spowalnianiu procesów dojrzewania i starzenia owoców. Istotny, choć wyraźnie mniejszy efekt dodatni odnotowano również dla liczby dni z opadami przekraczającymi 6 mm ($\beta = 0,208$) oraz liczby dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w okresie przedzbiorczym ($\beta = 0,186$), co wskazywało na korzystny wpływ chłodniejszych i bardziej przekropnych warunków panujących w okresie poprzedzającym zbiór jabłek na zachowanie jędrności miąższu.

Termin zbioru okazał się jednym z kluczowych czynników obniżających jędrność jabłek ($\beta = -0,442$), co podkreśla istotne znaczenie precyzyjnego określenia terminu zbioru dla jakości przechowalniczej owoców. Również długość symulowanego obrotu detalicznego wykazała wyraźny ujemny związek z jędrnością ($\beta = -0,414$), wskazując na pogarszanie się struktury miąższu w końcowych etapach łańcucha dystrybucji.

Zmiennymi o mniejszym, lecz statystycznie istotnym znaczeniu były długość przechowywania ($\beta = -0,058$) oraz długość symulowanego transportu ($\beta = -0,050$), które stopniowo, choć w ograniczonym zakresie, przyczyniały się do obniżenia jędrności miąższu. Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem wykazało dodatni, choć relatywnie niewielki wpływ na analizowaną cechę ($\beta = 0,069$).

Ostateczne równanie regresji (zamieszczone poniżej) wskazuje, że spośród wszystkich uwzględnionych w doświadczeniu czynników największe znaczenie dla utrzymania wysokiej jędrności jabłek w warunkach obrotu towarowego miały zabiegi podejmowane po zbiorze, w szczególności zastosowanie 1-MCP, właściwy termin zbioru oraz długość okresu symulowanego obrotu. Warunki atmosferyczne występujące przed zbiorem pełniły natomiast rolę wspierającą, kształtując jakość wyjściową owoców.

Ostateczna postać modelu regresji została wyrażona równaniem:

$$F = (0,24 \times X_1) + (0,81 \times X_2) + (1,68 \times X_3) + (-10,68 \times X_4) + (15,86 \times X_5) + (-0,43 \times X_7) + (-0,61 \times X_8) + (-6,13 \times X_9) + 54,7 \quad (2)$$

gdzie: X_1 – Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami; X_2 – Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm; X_3 – Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem; X_4 – Termin zbioru; X_5 – Zastosowanie 1-MCP po zbiorze; X_7 – Długość przechowywania; X_8 – Długość symulowanego transportu; X_9 – Długość symulowanego obrotu detalicznego.

Tabela 3. Wyniki krokowej analizy regresji wielorakiej dotyczącej jędrności jabłek odmiany ‘Gala’, uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego ($n = 2304$)

	Współczynniki niestandardyzowane		Współczynniki standaryzowane	<i>p</i>
	β	SE*	β	
Wyraz wolny			54,726	<0,001
Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami	0,24	0,024	0,186	<0,001
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	0,81	0,071	0,208	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	1,68	0,187	0,069	<0,001
Termin zbioru	-10,68	0,217	-0,442	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	15,86	0,187	0,656	<0,001
Długość przechowywania	-0,43	0,057	-0,058	<0,001
Długość symulowanego transportu	-0,61	0,094	-0,050	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	-6,13	0,115	-0,414	<0,001

*SE – błąd standardowy.

Wyniki analizy współczynnika eta kwadrat (η^2), zestawione w tabeli 4, pozwalają na ilościową ocenę udziału poszczególnych czynników w wyjaśnianiu zmienności jędrności jabłek odmiany ‘Gala’. Wszystkie analizowane zmienne wykazywały udowodniony statystycznie wpływ na badaną cechę ($p < 0,001$), jednak ich znaczenie było wyraźnie zróżnicowane.

Największy udział w wyjaśnianiu zmienności jędrności miąższu jabłek wykazało zastosowanie 1-MCP po zbiorze, dla którego wartość η^2 wyniosła 75,8%. Wynik ten potwierdza dominującą rolę pozbiorczego zastosowania tego związku w utrzymaniu trwałości struktury miąższu owoców podczas przechowywania. Równie wysoki udział w zmienności jędrności miąższu jabłek odnotowano dla długości symulowanego obrotu detalicznego ($\eta^2 = 55,5\%$) oraz terminu zbioru ($\eta^2 = 51,3\%$), co wskazuje, że zarówno

termin zbioru, jak i końcowy etap łańcucha dystrybucji mają kluczowe znaczenie dla zachowania jędrności jabłek odmiany ‘Gala’.

Warunki atmosferyczne występujące w okresie przedzbiorczym wykazywały umiarkowany, lecz statystycznie udowodniony wpływ na jędrność jabłek. Liczba dni z opadami przekraczającymi 6 mm wyjaśniała 5,49% zmienności tej cechy, natomiast liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C – 3,99%. Zbliżony udział w zmienności odnotowano dla zastosowania 1-MCP przed zbiorem ($\eta^2 = 3,39\%$), co sugeruje jego wspomagającą rolę w kształtowaniu jakości wyjściowej owoców.

Najmniejszy udział w wyjaśnianiu zmienności jędrności miąższu jabłek wykazały zmienne związane z czasem trwania poszczególnych etapów logistycznych. Długość przechowywania odpowiadała za 2,40% zmienności, natomiast długość symulowanego transportu – za 1,79%, co wskazuje, że ich wpływ, choć statystycznie udowodniony, był relatywnie niewielki w porównaniu z kluczowymi czynnikami omówionymi powyżej.

Uzyskane wyniki są spójne z rezultatami analizy regresji wielorakiej i potwierdzają, że jędrność jabłek odmiany ‘Gala’ jest w największym stopniu determinowana przez termin zbioru oraz zastosowanie 1-MCP po zbiorze, podczas gdy przebieg warunków atmosferycznych przed zbiorem oraz długość przechowywania i obrotu towarowego pełnią rolę uzupełniającą.

Tabela 4. Wyniki analizy współczynnika eta kwadrat (η^2) dla jędrności jabłek odmiany ‘Gala’, uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego

Zmienne niezależne	η^2 (%)	<i>p</i>
Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami	3,99	<0,001
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	5,49	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	3,39	<0,001
Termin zbioru	51,3	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	75,8	<0,001
Długość przechowywania	2,40	<0,001
Długość symulowanego transportu	1,79	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	55,5	<0,001

5.B.3. Kwasowość miareczkowa (TA)

Wyniki krokowej analizy regresji wielorakiej (tabela 5) wskazują, że kwasowość miareczkowa jabłek była istotnie kształtowana zarówno przez czynniki przedzbiorecze, jak i pozbiorecze, przy czym oddziaływanie tych czynników różniło się od obserwowanego w przypadku jędrności miąższu. Wszystkie zmienne uwzględnione w równaniu regresji okazały się istotne ($p < 0,001$), jednak wartości standaryzowanych współczynników β były na ogół o umiarkowanym natężeniu, co potwierdza bardziej rozproszony charakter regulacji tej cechy.

Najsilniejszy dodatni wpływ na kwasowość miareczkową wykazało zastosowanie 1-MCP po zbiorze ($\beta = 0,643$), co jednoznacznie wskazuje na wysoką skuteczność tego zabiegu w ograniczaniu spadku wartości omawianego wskaźnika podczas przechowywania jabłek. Istotny, choć wyraźnie mniejszy efekt dodatni odnotowano dla technologii przechowywania ($\beta = 0,063$), zastosowania 1-MCP przed zbiorem ($\beta = 0,065$) oraz liczby dni z opadami przed zbiorem ($\beta = 0,067$), co wskazuje na ich wspomagającą rolę w utrzymaniu wyjściowej kwasowości jabłek.

Czynnikiem najsilniej zmniejszającym kwasowość miareczkową jabłek był termin zbioru ($\beta = -0,235$), co wskazuje na postępujące zużycie kwasów organicznych wraz z zaawansowaniem dojrzałości zbiorczej. Porównywalny, ujemny wpływ wykazywała także długość przechowywania ($\beta = -0,244$), natomiast jeszcze silniejszy spadek kwasowości wiązał się z długością symulowanego obrotu detalicznego ($\beta = -0,372$). Długość symulowanego transportu miała wpływ istotny, lecz o wyraźnie mniejszym efekcie oddziaływania ($\beta = -0,071$). Uzyskane równanie regresji dowodzi, że zmiany TA w jabłkach zachodzą stopniowo i stanowią wypadkową oddziaływania wielu czynników, a nie wynik dominacji pojedynczej zmiennej.

Ostateczna postać modelu regresji została wyrażona równaniem:

$$TA = (0,001 \times X_2) + (0,006 \times X_3) + (-0,020 \times X_4) + (0,056 \times X_5) + (0,005 \times X_6) + (-0,006 \times X_7) + (-0,003 \times X_8) + (-0,020 \times X_9) + 0,274 \quad (3)$$

gdzie: X_2 – Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm; X_3 – Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem; X_4 – Termin zbioru; X_5 – Zastosowanie 1-MCP po zbiorze; X_6 – Technologia przechowywania; X_7 – Długość przechowywania; X_8 – Długość symulowanego transportu; X_9 – Długość symulowanego obrotu detalicznego.

Tabela 5. Wyniki krokowej analizy regresji wielorakiej dotyczącej kwasowości miareczkowej (TA) w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego (n = 2304)

	Współczynniki niestandardyzowane		Współczynniki standaryzowane	p
	β	SE*	β	
Wyraz wolny			0,274	<0,001
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	0,001	0,000	0,067	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	0,006	0,001	0,065	<0,001
Termin zbioru	-0,020	0,001	-0,235	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	0,056	0,001	0,643	<0,001
Technologia przechowywania	0,005	0,001	0,063	<0,001
Długość przechowywania	-0,006	0,000	-0,244	<0,001
Długość symulowanego transportu	-0,003	0,001	-0,071	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	-0,020	0,001	-0,372	<0,001

*SE – błąd standardowy.

Analiza współczynnika eta kwadrat (η^2), przedstawiona w tabeli 6, pozwala jednoznacznie wskazać czynniki o największym udziale w wyjaśnianiu zmienności kwasowości miareczkowej. Największy wpływ odnotowano w przypadku zastosowania 1-MCP po zbiorze ($\eta^2 = 56,3\%$), co podkreśla kluczową rolę pozbiorczego hamowania procesów dojrzewania jabłek oraz powiązanych z nimi przemian kwasów organicznych. Znaczący udział w zmienności TA miała również długość symulowanego obrotu detalicznego ($\eta^2 = 30,1\%$) oraz czas przechowywania owoców ($\eta^2 = 15,6\%$), co potwierdza silną zależność tej cechy od długości procesów pozbiorczych. Wpływ terminu zbioru był wyraźnie mniejszy ($\eta^2 = 14,4\%$), lecz nadal istotny, podkreślając znaczenie stopnia dojrzałości jabłek w momencie rozpoczęcia łańcucha pozbiorczego.

Pozostałe czynniki oceniane w doświadczeniu, takie jak liczba dni z opadami przekraczającymi 6 mm ($\eta^2 = 1,34\%$), zastosowanie 1-MCP przed zbiorem ($\eta^2 = 1,31\%$), technologia przechowywania ($\eta^2 = 1,20\%$) oraz długość symulowanego transportu ($\eta^2 = 1,54\%$), wykazały niewielki, choć statystycznie udowodniony wpływ na zmienność TA. Uzyskane wyniki wskazały, że kwasowość miareczkowa jabłek odmiany 'Gala' była w największym stopniu kształtowana przez pozbiorcze czynniki regulujące tempo dojrzewania oraz czas trwania kolejnych etapów łańcucha logistycznego, podczas gdy

wpływ warunków atmosferycznych i zastosowanych rozwiązań technologicznych pozostawał stosunkowo ograniczony, oddziałując głównie na dynamikę zachodzących procesów, a nie na ich zasadniczy kierunek.

Tabela 6. Wyniki analizy współczynnika eta kwadrat (η^2) dla kwasowości miareczkowej (TA) w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego

Zmienne niezależne	η^2 (%)	<i>p</i>
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	1,34	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	1,31	<0,001
Termin zbioru	14,4	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	56,3	<0,001
Technologia przechowywania	1,20	<0,001
Długość przechowywania	15,6	<0,001
Długość symulowanego transportu	1,54	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	30,1	<0,001

5.B.4. Zawartość ekstraktu (SSC)

Krokowa analiza regresji wielorakiej wykazała istotny wpływ wybranych czynników atmosferycznych, przed- i pozbiornego zastosowania 1-MCP oraz warunków przechowywania na zawartość ekstraktu w jabłkach odmiany 'Gala' ($n = 2304$). Ostateczna postać modelu regresji została przedstawiona w równaniu (4), natomiast szczegółowe wartości współczynników regresji, ich błędy standardowe, współczynniki standaryzowane β oraz poziomy istotności zestawiono w tabeli 7.

Najsilniejszy dodatni wpływ na SSC odnotowano w przypadku zastosowania 1-MCP po zbiorze ($\beta = 0,417$; $p < 0,001$), co wskazuje, że zabieg ten sprzyjał utrzymaniu, a niekiedy nawet wzrostowi zawartości ekstraktu w jabłkach podczas przechowywania i symulowanego obrotu detalicznego. Natomiast zastosowanie 1-MCP przed zbiorem istotnie obniżało SSC ($\beta = -0,409$; $p < 0,001$), podkreślając tym samym kluczowe znaczenie terminu aplikacji tego inhibitora etylenu.

Wśród czynników atmosferycznych istotny dodatni wpływ na SSC odnotowano w przypadku liczby dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C przed zbiorem ($\beta = 0,146$; $p < 0,001$) oraz liczby dni z opadami przekraczającymi 6 mm ($\beta = 0,205$; $p < 0,001$). Wyniki te wskazują, że chłodniejsze dni oraz większa liczba dni z opadami deszczu we wrześniu sprzyjały akumulacji cukrów w jabłkach.

Termin zbioru wykazywał istotny ujemny związek z SSC ($\beta = -0,148$; $p < 0,001$), co dowodzi, że późniejszy zbiór wiązał się z niższą zawartością ekstraktu w owocach.

Podobną zależność zaobserwowano w przypadku długości przechowywania, która również istotnie obniżała SSC ($\beta = -0,199$; $p < 0,001$), potwierdzając tym samym postępujące zużycie cukrów przez jabłka podczas długotrwałego składowania.

Pozostałe zmienne oceniane w opisywanym doświadczeniu – technologia przechowywania ($\beta = 0,033$; $p = 0,025$) oraz długość symulowanego obrotu detalicznego ($\beta = 0,039$; $p = 0,008$) – wykazywały wprawdzie statystycznie udowodniony wpływ na SSC, jednak był on relatywnie niewielki. Wyraz wolny modelu wyniósł 12,745 ($p < 0,001$), co odpowiada wartości bazowej SSC przy zerowych wartościach wszystkich zmiennych niezależnych, zgodnie z równaniem (4).

Ostateczna postać modelu regresji została wyrażona równaniem:

$$\text{SSC} = (0,012 \times X_1) + (0,051 \times X_2) + (-0,623 \times X_3) + (-0,225 \times X_4) + (0,636 \times X_5) + (0,051 \times X_6) + (-0,093 \times X_7) + (0,037 \times X_9) + 12,7 \quad (4)$$

gdzie: X_1 – Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami; X_2 – Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm; X_3 – Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem; X_4 – Termin zbioru; X_5 – Zastosowanie 1-MCP po zbiorze; X_6 – Technologia przechowywania; X_7 – Długość przechowywania; X_9 – Długość symulowanego obrotu detalicznego.

Tabela 7. Wyniki krokowej analizy regresji wielorakiej dotyczącej zawartości ekstraktu rozpuszczalnego (SSC) w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego ($n = 2304$)

	Współczynniki niestandardyzowane		Współczynniki standaryzowane	<i>p</i>
	β	SE*	β	
Wyraz wolny			12,745	<0,001
Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami	0,012	0,003	0,146	<0,001
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	0,051	0,009	0,205	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	-0,623	0,023	-0,409	<0,001
Termin zbioru	-0,225	0,026	-0,148	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	0,636	0,023	0,417	<0,001
Technologia przechowywania	0,051	0,023	0,033	0,025
Długość przechowywania	-0,093	0,007	-0,199	<0,001

Długość symulowanego obrotu detalicznego	0,037	0,014	0,039	0,008
--	-------	-------	-------	-------

*SE – błąd standardowy.

Analiza współczynnika eta kwadrat (η^2) umożliwiła ocenę względnego udziału poszczególnych zmiennych niezależnych w wyjaśnianiu zmienności zawartości ekstraktu (SSC) w jabłkach odmiany 'Gala' (tabeli 8). Wszystkie uwzględnione czynniki wykazały statystycznie udowodniony wpływ na SSC ($p < 0,05$), przy czym ich siła oddziaływania była zróżnicowana.

Największy udział w wyjaśnianiu zmienności SSC został przypisany zabiegom związanym z zastosowaniem 1-MCP, pełniącego funkcję czynnika regulującego wydzielanie etylenu. Zastosowanie 1-MCP po zbiorze wykazało najwyższą wartość współczynnika η^2 (25,7%; $p < 0,001$), co podkreśla kluczową rolę tego zabiegu w kształtowaniu zawartości ekstraktu. Porównywalnie wysoki efekt odnotowano również w przypadku zastosowania 1-MCP przed zbiorem ($\eta^2 = 24,9\%$; $p < 0,001$), co potwierdza dominujące znaczenie tego inhibitora etylenu w regulacji procesów metabolicznych decydujących o wartości omawianego wskaźnika jakości jabłek.

Czynniki atmosferyczne wykazywały relatywnie niewielki, choć statystycznie udowodniony wpływ na SSC. Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C przed zbiorem wyjaśniała jedynie 0,69% zmienności tej cechy ($p < 0,001$), natomiast liczba dni z intensywnymi opadami (> 6 mm) – 1,52% ($p < 0,001$). Również technologia przechowywania ($\eta^2 = 0,22\%$; $p = 0,026$) oraz długość symulowanego obrotu detalicznego ($\eta^2 = 0,31\%$; $p = 0,008$) charakteryzowały się marginalnym udziałem w wyjaśnianiu zmienności zawartości ekstraktu.

W podsumowaniu można stwierdzić, że zawartość ekstraktu w jabłkach odmiany 'Gala' była w największym stopniu determinowana przez czynniki związane z regulacją procesów dojrzewania, w szczególności przez zastosowanie 1-MCP przed i po zbiorze, które charakteryzowało się wysokim udziałem w wyjaśnianiu zmienności tej cechy. Sformułowany wniosek pozostaje w pełni spójny z wynikami analizy regresji wielorakiej przedstawionymi w równaniu (4) oraz w tabeli 7.

Tabela 8. Wyniki analizy współczynnika eta kwadrat (η^2) dla zawartości ekstraktu rozpuszczalnego (SSC) w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania oraz długość symulowanego obrotu detalicznego

Zmienne niezależne	η^2 (%)	<i>p</i>
Liczba dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej 15°C w ciągu ostatnich 30 (lub 44) dni przed zbiorami	0,69	<0,001
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	1,52	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	24,9	<0,001
Termin zbioru	3,10	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	25,7	<0,001
Technologia przechowywania	0,22	0,026
Długość przechowywania	7,26	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	0,31	0,008

5.B.5. SSC/TA

Wyniki krokowej analizy regresji wielokrotnej wskazują, że spośród zmiennych uwzględnionych w procedurze modelowania – obejmujących warunki atmosferyczne oraz oceniane czynniki przedzbiorcze, pozbiorcze i logistyczne – istotny statystycznie wpływ na wartość wskaźnika SSC/TA wykazały wyłącznie predyktory uwzględnione w modelu końcowym ($p < 0,001$). Uzyskane równanie regresji umożliwia określenie zarówno kierunku, jak i względnej siły oddziaływania poszczególnych czynników na zmienność analizowanego wskaźnika (tabeli 9).

Najsilniejszy ujemny wpływ na wartość wskaźnika SSC/TA stwierdzono w przypadku zastosowania związku 1-MCP po zbiorze ($\beta = -0,561$), co wskazuje, że blokowanie receptorów etylenu istotnie obniżało wartość analizowanego parametru. Należy podkreślić, że aplikacja tego związku przed zbiorem jabłek również wywierała istotny efekt ujemny ($\beta = -0,215$), co potwierdza rolę etylenu w regulacji złożonych procesów dojrzewania decydujących o jakości owoców. Ujemny, choć wyraźnie słabszy wpływ odnotowano także w odniesieniu do zastosowanych warunków przechowywania ($\beta = -0,073$).

Najsilniejszy dodatni wpływ na wartość analizowanego wskaźnika wykazywała długość symulowanego obrotu detalicznego (shelf-life) ($\beta = 0,406$), co wskazuje, że wydłużenie etapu dystrybucji po zakończeniu przechowywania sprzyjało wzrostowi wartości proporcji SSC/TA. Istotny dodatni efekt stwierdzono również w odniesieniu do terminu zbioru ($\beta = 0,204$) oraz czasu przechowywania ($\beta = 0,172$), co jednoznacznie potwierdza kluczową rolę czynników związanych z upływem czasu w przebiegu procesów fizjologicznych i biochemicznych odzwierciedlanych przez analizowany

parametr. Choć analogiczny kierunek zmian obserwowano także w przypadku długości symulowanego transportu, oddziaływanie tego czynnika było relatywnie niewielkie ($\beta = 0,067$), co wskazuje na jego ograniczone znaczenie w porównaniu z pozostałymi predyktorami (5).

Ostateczna postać modelu regresji została wyrażona równaniem:

$$\text{SSC/TA} = (-5,317 \times X_3) + (5,047 \times X_4) + (-13,855 \times X_5) + (-1,806 \times X_6) + (1,304 \times X_7) + (0,834 \times X_8) + (6,148 \times X_9) + 46,03 \quad (5)$$

gdzie: X_3 – Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem; X_4 – Termin zbioru; X_5 – Zastosowanie 1-MCP po zbiorze; X_6 – Technologia przechowywania; X_7 – Długość przechowywania; X_8 – Długość symulowanego transportu; X_9 – Długość symulowanego obrotu detalicznego

Tabela 9. Wyniki krokowej analizy regresji wielorakiej dotyczącej stosunku SSC/TA w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego (n = 2304)

	Współczynniki niestandardyzowane		Współczynniki standaryzowane	p
	β	SE*	β	
Wyraz wolny			46,027	<0,001
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	-5,317	0,324	-0,215	<0,001
Termin zbioru	5,047	0,324	0,204	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	-13,855	0,324	-0,561	<0,001
Technologia przechowywania	-1,806	0,324	-0,073	<0,001
Długość przechowywania	1,304	0,099	0,172	<0,001
Długość symulowanego transportu	0,834	0,162	0,067	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	6,148	0,198	0,406	<0,001

*SE – błąd standardowy.

Znaczenie poszczególnych czynników w kształtowaniu wartości proporcji SSC/TA potwierdziła analiza siły efektu przedstawiona w tabeli 10. Największy udział w wyjaśnianiu zmienności analizowanego wyróżnika miał zabieg z zastosowaniem związku 1-MCP po zbiorze, który odpowiadał za 44,4% całkowitej wariancji.

Drugim pod względem istotności czynnikiem była długość symulowanego obrotu detalicznego, która wyjaśniała 29,6% zmienności analizowanego parametru. W dalszej kolejności znaczący udział w kształtowaniu wartości wskaźnika miały czynniki związane z terminem zbioru oraz przebiegiem przechowywania. Zastosowanie 1-MCP przed

zbiorem ($\eta^2 = 10,5\%$) oraz termin zbioru ($\eta^2 = 9,59\%$) wykazywały porównywalną siłę oddziaływania, natomiast długość przechowywania odpowiadała za 7,02% całkowitej wariancji. Pozostałe predyktory charakteryzowały się wyraźnie mniejszą siłą efektu – technologia przechowywania oraz długość symulowanego transportu wyjaśniały odpowiednio 1,33% i 1,14% zmienności wskaźnika SSC/TA, co wskazuje na ich marginalne znaczenie w porównaniu z pozostałymi czynnikami.

Taki rozkład wartości współczynnika η^2 wskazuje, że zmienność badanego wskaźnika była w przeważającym stopniu determinowana przez pozbiórcze zastosowanie 1-MCP oraz długość obrotu towarowego jabłek, natomiast czynniki pogodowe – choć uwzględnione na etapie modelowania – nie wykazały statystycznie istotnego wpływu i w konsekwencji nie zostały uwzględnione w modelu końcowym.

Tabela 10. Wyniki analizy współczynnika eta kwadrat (η^2) dla stosunku SSC/TA w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego

Zmienne niezależne	η^2 (%)	<i>P</i>
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	10,5	<0,001
Termin zbioru	9,59	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	44,4	<0,001
Technologia przechowywania	1,33	<0,001
Długość przechowywania	7,02	<0,001
Długość symulowanego transportu	1,14	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	29,6	<0,001

5.B.6. Kwas 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowy (ACC)

Krokowa analiza regresji wielorakiej wykazała, że spośród zmiennych uwzględnionych w procedurze modelowania jedynie predyktory włączone do modelu końcowego wywierały statystycznie udowodniony wpływ na zawartość kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyłowego (ACC) w jabłkach odmiany 'Gala' ($p < 0,001$). Ostateczną postać równania regresji przedstawiono w równaniu (6), natomiast szczegółowe wartości współczynników zestawiono w tabeli 11.

Najsilniejszy dodatni wpływ na zawartość ACC wykazywała długość przechowywania ($\beta = 0,334$), co wskazuje na stopniowe zwiększanie się zasobu prekursora etylenu wraz z wydłużaniem czasu magazynowania owoców. Istotny dodatni efekt odnotowano również w przypadku długości symulowanego obrotu detalicznego

($\beta = 0,261$), co sugeruje dalsze zwiększanie się zasobu prekursora etylenu, sprzyjające intensyfikacji procesów metabolicznych zachodzących na etapie dystrybucji handlowej. Dodatni, choć wyraźnie słabszy wpływ stwierdzono także w odniesieniu do technologii przechowywania ($\beta = 0,138$) oraz terminu zbioru jabłek ($\beta = 0,059$).

Najsilniejszy efekt ujemny zaobserwowano po zastosowaniu 1-MCP po zbiorze ($\beta = -0,313$), co jednoznacznie potwierdza skuteczność tego zabiegu w ograniczaniu nagromadzenia ACC, a tym samym w hamowaniu procesów zależnych od etylenu. Negatywny, choć wyraźnie słabszy wpływ odnotowano również w przypadku zastosowania 1-MCP przed zbiorem ($\beta = -0,075$). Ujemną zależność wykazano także względem liczby dni z intensywnymi opadami (> 6 mm) ($\beta = -0,144$), co sugeruje możliwy pośredni wpływ warunków atmosferycznych na przebieg procesów fizjologicznych związanych z syntezą ACC.

Długość symulowanego transportu wykazywała wpływ dodatni, jednak jego siła była relatywnie niewielka ($\beta = 0,065$), co wskazuje na ograniczone znaczenie tego etapu postępowania z jabłkami w porównaniu z czasem przechowywania i obrotem detalicznym. Wyraz wolny modelu nie osiągnął istotności statystycznej ($p = 0,217$), co sugeruje, że zmienność ACC była w dużym stopniu wyjaśniana przez predyktory uwzględnione w modelu regresji, przedstawionym w poniższym równaniu.

Ostateczna postać modelu regresji została wyrażona równaniem:

$$ACC = (-0,015 \times X_2) + (-0,045 \times X_3) + (0,038 \times X_4) + (-0,203 \times X_5) + (0,090 \times X_6) + (0,066 \times X_7) + (0,021 \times X_8) + (0,104 \times X_9) - 0,065 \quad (6)$$

gdzie: X_2 – Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm; X_3 – Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem; X_4 – Termin zbioru; X_5 – Zastosowanie 1-MCP po zbiorze; X_6 – Technologia przechowywania; X_7 – Długość przechowywania; X_8 – Długość symulowanego transportu; X_9 – Długość symulowanego obrotu detalicznego.

Tabela 11. Wyniki krokowej analizy regresji wielorakiej dotyczącej zawartości kwasu l-aminocyklopropano-1-karboksyłowego (ACC) w jabłkach odmiany 'Gala', uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego liczbę dni we wrześniu, w których średnia temperatura powietrza była niższa niż 15°C, liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm, zastosowanie 1-MCP przed zbiorem, termin zbioru, zastosowanie 1-MCP po zbiorze, technologię przechowywania, długość przechowywania, długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego ($n = 2304$)

	Współczynniki niestandardyzowane		Współczynniki standaryzowane	<i>p</i>
	β	SE*	β	
Wyraz wolny			-0,065	0,217
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	-0,015	0,002	-0,144	<0,001

Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	-0,045	0,011	-0,075	<0,001
Termin zbioru	0,038	0,011	0,059	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	-0,203	0,011	-0,313	<0,001
Technologia przechowywania	0,090	0,011	0,138	<0,001
Długość przechowywania	0,066	0,003	0,334	<0,001
Długość symulowanego transportu	0,021	0,006	0,063	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	0,104	0,007	0,261	<0,001

*SE – błąd standardowy.

Znaczenie poszczególnych czynników w kształtowaniu zmienności zawartości ACC potwierdziła analiza współczynnika eta kwadrat (η^2), przedstawiona w tabeli 12. Największy udział w wyjaśnianiu wariancji przypadła długości przechowywania, która odpowiadała za 14,2% całkowitej zmienności ACC, co jednoznacznie podkreśla kluczową rolę tego czynnika w nagromadzeniu omawianego prekursora etylenu.

Drugim pod względem istotności czynnikiem było zastosowanie 1-MCP po zbiorze ($\eta^2 = 12,7\%$), co potwierdza jego kluczowe znaczenie w regulacji procesów dojrzewania w okresie pozbiorczym. Znaczący udział w zmienności wykazywała również długość symulowanego obrotu detalicznego ($\eta^2 = 9,22\%$), wskazując na dalsze nasilenie zmian metabolicznych po zakończeniu przechowywania chłodniczego.

Technologia przechowywania charakteryzowała się umiarkowaną siłą efektu ($\eta^2 = 2,77\%$), podczas gdy zastosowanie 1-MCP przed zbiorem ($\eta^2 = 0,83\%$) oraz termin zbioru ($\eta^2 = 0,61\%$) wykazywały wyraźnie mniejsze, choć statystycznie udowodnione znaczenie. Najslabszymi predyktorami zmienności zawartości kwasu ACC okazały się długość symulowanego transportu ($\eta^2 = 0,59\%$) oraz liczba dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm ($\eta^2 = 0,21\%$).

Rozkład wartości współczynnika η^2 wskazał, że zawartość ACC w jabłkach była determinowana przede wszystkim przez długość przechowywania oraz zabiegi pozbiorcze, podczas gdy czynniki atmosferyczne i logistyczne odgrywały rolę drugorzędną. Obserwowany rozkład siły efektu poszczególnych ocenianych czynników pozostawał w pełnej zgodności z wynikami regresji wielorakiej (tabela 11; równanie 6), podkreślając decydujące znaczenie procesów związanych z regulacją biosyntezy etylenu w okresie pozbiorczym.

Tabela 12. Wyniki analizy współczynnika eta kwadrat (η^2) dla zawartości kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksyowego (ACC) w jabłkach odmiany ‘Gala’, uzyskane na podstawie modelu uwzględniającego: liczbę dni, w których skumulowane opady przekraczały 6 mm; zastosowanie 1-MCP przed zbiorem; termin zbioru; zastosowanie 1-MCP po zbiorze; technologię przechowywania; długość przechowywania; długość symulowanego transportu oraz długość symulowanego obrotu detalicznego

Zmienne niezależne	η^2 (%)	<i>p</i>
Liczba dni, w których skumulowane opady przekroczyły 6 mm	0,21	0,030
Zastosowanie 1-MCP przed zbiorem	0,83	<0,001
Termin zbioru	0,61	<0,001
Zastosowanie 1-MCP po zbiorze	12,7	<0,001
Technologia przechowywania	2,77	<0,001
Długość przechowywania	14,2	<0,001
Długość symulowanego transportu	0,59	<0,001
Długość symulowanego obrotu detalicznego	9,22	<0,001

6.B. Dyskusja

Uzyskane wyniki potwierdziły, że jakość pozbiorcza jabłek odmiany ‘Gala’ była w największym stopniu kształtowana przez decyzje technologiczne podejmowane po zbiorze oraz czynniki związane z „końcowym odcinkiem” łańcucha dostaw, podczas gdy warunki atmosferyczne w okresie przedzbiorczym pełniły rolę modulującą jakość wyjściową owoców (PIV). Taki układ zależności pozostaje spójny z aktualnym kierunkiem badań nad zarządzaniem fizjologią owoców w przechowywalnictwie, w którym kluczowe znaczenie przypisuje się regulacji etylenu, dojrzałości zbiorczej oraz warunkom i długości ekspozycji na temperaturę i stężenie tlenu w trakcie przechowywania i dystrybucji (Zhang i in., 2022a; Keller-Przybyłkiewicz i in., 2025; Weigl i in., 2026). W praktyce nabiera to szczególnego znaczenia w obliczu rosnącej presji na poszukiwanie nowych rynków zbytu – zwłaszcza eksportowych – przy jednoczesnym wzroście oczekiwań konsumentów dotyczących jędrności, soczystości oraz utrzymania stabilnej jakości jabłek przez cały rok (Trejer i Dyngus, 2013; O’Neil i in., 2015; Chen i in., 2017).

Porównanie sezonów 2022 i 2023 wykazało, że rok 2023 charakteryzował się wyższymi temperaturami oraz wyraźnym niedoborem opadów w kluczowej części sezonu wegetacyjnego (PIV). Literatura wskazuje, że stres wodny może modyfikować metabolizm cukrów i kwasów organicznych oraz przebieg dojrzewania, wpływając bezpośrednio na wartości SSC i TA, a pośrednio na trwałość pozbiorcza owoców (Do i in., 2024).

Badania fizjologiczne wskazują ponadto na ścisły związek między gospodarką wodną a metabolizmem cukrów oraz reakcją roślin na stres, co może tłumaczyć obserwowaną wrażliwość jakości wyjściowej owoców na przebieg warunków atmosferycznych w końcowej fazie sezonu (Tao i in., 2022). Jednocześnie wyniki **PIV** sugerują, że nawet przy występowaniu różnic pogodowych dominującą rolę w kształtowaniu jakości końcowej pełnią czynniki pozbiorcze, co wzmacnia argument o nadrzędnym znaczeniu technologii przechowywania i dystrybucji w stosunku do warunków atmosferycznych.

W badaniach wieloczynnikowych najsilniejszy wpływ na utrzymanie jędrności jabłek wykazało zastosowanie 1-MCP po zbiorze, podczas gdy zabieg przedzbiorczy miał wpływ istotny, lecz wyraźnie słabszy (**PIV**). Taka hierarchia efektów jest zgodna z wcześniejszymi doniesieniami, w których stosowanie 1-MCP po zbiorze konsekwentnie wiązano z ograniczeniem działania etylenu i spowolnieniem mięknięcia jabłek w trakcie długotrwałego przechowywania (Lee i in., 2019; Doerflinger i in., 2024; Kwon i in., 2024; Zhang i in., 2024b). W **PIII** zależność ta została pokazana w sposób szczególnie wyraźny w warunkach eksportowych: utrzymanie jędrności jabłek było ściśle powiązane z reakcją etylenową, a zastosowanie 1-MCP – zwłaszcza po zbiorze – skutecznie ograniczało tempo dojrzewania, umożliwiając wydłużenie okresu przydatności do spożycia przy wysokich temperaturach panujących na rynku docelowym. (Blankenship i Dole, 2003). Jednocześnie w **PIII** przyjęto kryterium jakości konsumenckiej oparte na minimalnej jędrności 55 N (Hoehn i in., 2003a), co pozwoliło bezpośrednio powiązać parametry instrumentalne z praktycznym ryzykiem utraty jakości na rynku docelowym.

Warto podkreślić, że w pracy **PIII** zastosowanie 1-MCP nie powodowało całkowitego „zablokowania” dojrzewania jabłek odmiany ‘Gala’, co odróżnia tę reakcję od opisów dotyczących niektórych gatunków i sytuacji, w których po wysokich dawkach 1-MCP obserwowano ograniczenie zdolności do dojrzewania (Watkins, 2006; Chiriboga i in., 2011; Dong i in., 2014; Wang i Sugar, 2015). Wyniki pracy **PIII** sugerują raczej spowolnienie procesów zależnych od etylenu, co jest korzystne technologicznie, ponieważ pozwala zachować jakość owoców, nie eliminując całkowicie zmian fizjologicznych towarzyszących dojrzewaniu. Jednocześnie praca **PIII** dostarcza argumentu mechanistycznego wspierającego różnicę skuteczności między zabiegiem przed- i pozbiorczym: owoce traktowane 1-MCP po zbiorze wykazywały niższą produkcję etylenu niż jabłka opryskiwane przed zbiorem (McArtney i in., 2008;

Villalobos-Acuña i in., 2010). Jest to spójne z interpretacją, że owoce pozostające na drzewie po zastosowaniu 1-MCP mogą wytwarzać nowe receptory etylenu, co przywraca ich wrażliwość na etylen i skutkuje wcześniejszym lub intensywniejszym wydzielaniem tego hormonu w porównaniu z traktowaniem pozbiorczym (McArtney i in., 2008; Villalobos-Acuña i in., 2010). W konsekwencji łączne zastosowanie 1-MCP przed i po zbiorze działało w pracy **PIII** najbardziej stabilizująco na jakość owoców, co było zgodne z wcześniejszymi obserwacjami innych autorów przywoływanych w **PIII** (Bühlmann i Rebeaud, 2017; Małachowska i Tomala, 2022; Tomala i in., 2023).

W pracy **PIV** silny ujemny wpływ terminu zbioru oraz długości symulowanego obrotu detalicznego na jędrność jabłek potwierdza, że „czas po zbiorze” przyspiesza tempo zmian strukturalnych owoców (Weigl i in., 2026). Praca **PIII** dostarcza praktycznego rozwinięcia tej tezy: późniejszy zbiór (DH) wyraźnie nasilał utratę jędrności jabłek, a wydłużanie obrotu detalicznego w temperaturze 25°C prowadziło do szybkiego spadku jakości, zwłaszcza w kombinacjach bez pozbiorczego zastosowania 1-MCP. Dodatkowo wyniki zamieszczone w pracy **PIII** mogą stanowić swoiste potwierdzenie, że ekspresja genów związanych z produkcją etylenu zależy od stopnia dojrzałości owoców (Thongkum i in., 2018), co wspiera interpretację efektu terminu zbioru w kontekście różnic w odpowiedzi etylenowej. Jednocześnie praca **PIII** wykazuje, że utrzymanie kryterium minimalnej jędrności jabłek (55 N) na rynku docelowym jest możliwe wyłącznie przy odpowiednio dobranej strategii zastosowania 1-MCP, właściwym terminie zbioru oraz właściwie zaplanowanym limicie czasowym w warunkach wysokiej temperatury (Hoehn i in., 2003a) – co dodatkowo potwierdza wniosek zamieszczony w pracy **PIV** o dominującej roli decyzji pozbiorczych nad czynnikami wcześniejszymi.

Warto podkreślić, że względna rola terminu zbioru, długości przechowywania oraz etapu obrotu detalicznego może wykazywać wyraźną zmienność odmianową. W przypadku jabłek odmiany ‘Granny Smith’ kluczowy wpływ na wskaźniki jędrności i dojrzałości owoców wykazywały termin zbioru oraz długość przechowywania, podczas gdy wpływ okresu symulowanego obrotu był umiarkowany (Sredojevic i in., 2025). Porównanie tych obserwacji z wynikami uzyskanymi dla jabłek ‘Gala Schniga’ (prace **PIII** i **PIV**) wskazuje, że w warunkach wydłużonego łańcucha dystrybucyjnego owoce tej odmiany są relatywnie bardziej wrażliwe na „czas w cieple” po wyjęciu z chłodni. W praktyce oznacza to konieczność szczególnie rygorystycznego zarządzania etapem

obrotu detalicznego oraz priorytetowego zastosowania 1-MCP po zbiorze, jeśli celem jest zachowanie zarówno jędrności jabłek, jak i wskaźnika TA.

W pracy **PIV** zmienność wskaźnika TA była najsilniej powiązana z czynnikami pozbiorczymi regulującymi tempo dojrzewania, w tym z czasem przechowywania i obrotu detalicznego. Szczególne znaczenie miało zastosowanie 1-MCP po zbiorze, które pozwalało utrzymać wyższe wartości TA, wskazując na spowolnienie metabolizmu kwasów organicznych (Zhang i in., 2022a; Kwon i in., 2024). Praca **PIII** potwierdza tę zależność w warunkach eksportowych: kwasowość owoców ulegała istotnemu obniżeniu wraz z wydłużaniem czasu w temperaturze 25°C, natomiast 1-MCP – zwłaszcza po zbiorze – sprzyjał utrzymaniu wyższej TA. Efekt ten można wiązać z niższą aktywnością etylenową oraz prawdopodobnym ograniczeniem intensywności procesu oddychania owoców (Pre-Aymard i in., 2005; Toivonen i Lu, 2005; Łysiak i in., 2021; Steffens i in., 2021). Opisane obserwacje są zgodne z doniesieniami literaturowymi, które wskazują, że kwasy organiczne są zużywane w procesie oddychania, a spowolnienie dojrzewania i metabolizmu oddechowego może ograniczać tempo ich ubytku. (Kwon i in., 2024).

W przeciwieństwie do jędrności jabłek, TA wykazywała bardziej złożony, wieloczynnikowy charakter regulacji, w którym – oprócz dominującego mechanizmu – istotną rolę odgrywają czynniki modulujące dynamikę zmian w czasie (Brizzolara i in., 2020; Win i in., 2021). Oznacza to, że utrzymanie pożądanej TA wymaga przede wszystkim skutecznego ograniczania tempa dojrzewania po zbiorze oraz skracania okresów ekspozycji owoców na warunki sprzyjające intensywnemu oddychaniu, zwłaszcza w trakcie obrotu detalicznego. W pracy **PIII** dodatkowo podkreślono, że konsumenci preferują owoce o dobrze zbalansowanym stosunku cukrów do kwasów (Hoehn i in., 2003b), co wzmacnia znaczenie kontroli kwasowości jabłek (TA) w strategiach eksportowych.

Dla wskaźnika zawartości ekstraktu (SSC) oraz wzajemnej proporcji SSC/TA, przedstawionych w pracy **PIV**, kluczowe znaczenie miały zabiegi 1-MCP oraz czynniki związane z dystrybucją. Literatura wskazuje, że 1-MCP może stabilizować parametry jakościowe owoców, jednocześnie ograniczając wzrost SSC/TA, co interpretuje się jako spowolnienie przesuwania profilu sensorycznego w kierunku dominacji słodczy przy spadku kwasowości (Zhang i in., 2022a; Kwon i in., 2024). Jednocześnie prace **PIII** i **PIV** pokazują, że wraz z wydłużaniem czasu przechowywania i ekspozycji w warunkach rynkowych wartość proporcji SSC/TA rośnie, głównie dlatego, że TA spada

szybciej niż SSC. Zjawisko to ma istotne znaczenie rynkowe – wzrost SSC/TA może być odbierany jako „łagodniejszy” smak, ale równocześnie może sygnalizować spadek świeżości i skrócenie trwałości handlowej owoców z uwagi na utratę jędrności jabłek i ich kwasowości (Hasan i in., 2024). W pracy **PIII** zwrócono uwagę, że wartości SSC i TA bywają utożsamiane z zawartością składników odżywczych (Jha i in., 2011; Fu i in., 2017), natomiast jędrność i soczystość jabłek są postrzegane jako kluczowe wskaźniki świeżości owoców (Péneau i in., 2006). Ponadto praca **PIII** wskazuje, że wpływ 1-MCP na zawartość SSC bywa różnie oceniany w literaturze (Cheng i in., 2018; Błaszczuk i Gasparski, 2019; Yoo i in., 2020a; Yoo i in., 2020b), przy czym w prezentowanych badaniach pozbiornicze zastosowanie 1-MCP sprzyjało wyższej zawartości SSC niż opryskiwanie drzew preparatem Harvista™, a analogiczny wzrost SSC po zastosowaniu 1-MCP odnotowano również we wcześniejszych badaniach (Rupasinhe i in., 2000). W pracy **PIII** podkreślono również, że w trakcie dojrzewania jabłek wartości SSC i TA mogą ulegać obniżeniu, a wielkość tego spadku jest ściśle powiązana z długością przechowywania (DeEll i Lum, 2017). Dla odmiany ‘Gala’, charakteryzującej się relatywnie niską kwasowością, aspekt ten ma szczególne znaczenie, ponieważ nadmierny spadek TA może prowadzić do postrzegania owoców jako zbyt słodkich (**PIII**).

W pracy **PIV** najsilniejsze dodatnie powiązanie zawartości ACC z długością przechowywania i obrotu detalicznego wskazuje na narastanie aktywności szlaku etylenowego wraz z upływem czasu, natomiast silny efekt ujemny wynikający z zastosowania 1-MCP po zbiorze potwierdza skuteczne zmniejszenie ilości bezpośredniego prekursora etylenu w wymiarze biochemicznym. Obserwacje te są zgodne z wcześniejszymi doniesieniami, w których 1-MCP spowalnia zmiany jakościowe podczas długotrwałego przechowywania, obejmujące procesy związane z oddychaniem, mięknięciem, zmianami barwy zasadniczej oraz wybranymi zaburzeniami fizjologicznymi, co sprzyja wydłużeniu okresu przechowywania jabłek przy zachowaniu wysokiej ich jakości (Guo i in., 2020; Zhang i in., 2020; Zhang i in., 2022b; Li i in., 2023; Sidhu i in., 2024; Weigl i in., 2026).

W pracy **PIV** warunki symulowanego transportu wykazały istotny, lecz stosunkowo niewielki wpływ na parametry jakości jabłek, co sugeruje, że sam czas transportu nie był czynnikiem decydującym w badanym układzie. Kluczowe znaczenie miały łączny czas ekspozycji owoców na warunki po wyjęciu z chłodni – obejmujący etap obrotu detalicznego – oraz stopień dojrzałości w czasie zbioru (**PIV**). Praca **PIII** doprecyzowuje tę interpretację: wydłużenie transportu w temperaturze 25°C ujawniało

się przede wszystkim w pierwszych dniach poprzez modyfikację odpowiedzi etylenowej i przyspieszenie pogarszania się jakości, przy czym efekt ten pozostawał silnie zależny od kombinacji ze zastosowaniem 1-MCP oraz od tego, czy eksport następował bezpośrednio po zbiorze, czy po przechowywaniu. W obu ujęciach spójny pozostaje wniosek, że krytyczne znaczenie mają nie pojedyncze odcinki logistyczne, lecz skumulowana ekspozycja na warunki przyspieszające starzenie, szczególnie w etapie handlu detalicznego (Shoji i in., 2022; Hasan i in., 2024).

Wyniki przedstawione w pracy **PIV**, wskazujące na stosunkowo niewielki wpływ technologii przechowywania (ULO vs quasi-DKA) na większość ocenianych parametrów, można interpretować w dwojaki sposób. Po pierwsze, przy skutecznym zastosowaniu 1-MCP – szczególnie po zbiorze – część przewagi wynikającej z bardziej zaawansowanych reżimów przechowalniczych może ulegać zmniejszeniu, gdyż główny regulator dojrzewania, czyli etylen, jest funkcjonalnie ograniczony (Thewes i in., 2020; Ludwig i in., 2022; Tuna Güneş i Horzum, 2024). Po drugie, literatura wskazuje, że DKA może wspomagać utrzymanie jakości w porównaniu z klasycznym ULO, jednak efekty te zależą od odmiany, stopnia dojrzałości jabłek w czasie zbioru oraz oczekiwań jakościowych; w niektórych przypadkach DKA wykazuje skuteczność porównywalną z kombinacją KA + 1-MCP (Thewes i in., 2021; de Candido de Oliveira i in., 2025). W tym kontekście wyniki pracy **PIV** wskazują, że dla odmiany ‘Gala Schniga’ kluczowe znaczenie ma strategia związana z terminem zastosowania 1-MCP oraz ograniczaniem „czasu w cieple”, natomiast wybór technologii ULO lub DKA pełni rolę wspomagającą.

Jednocześnie niektórzy badacze zwracają uwagę na potencjalne koszty sensoryczne związane z intensywnym hamowaniem dojrzewania (np. ograniczenie aromatu) w warunkach KA/ULO oraz przy zastosowaniu 1-MCP, co może mieć istotne znaczenie dla segmentu jabłek „premium”. W związku z tym decyzje technologiczne powinny uwzględniać nie tylko parametry instrumentalne, lecz także pełny profil aromatyczno-sensoryczny owoców (Al Shoffe i in., 2024; Khera i in., 2024).

Uwzględnienie wyników przedstawionych w pracach **PIII** i **PIV** prowadzi do spójnego wniosku praktycznego: w warunkach wydłużonego łańcucha dystrybucyjnego najbardziej efektywną strategią utrzymania akceptowalnej jakości jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ jest precyzyjna kontrola terminu zbioru, priorytetowe zastosowanie 1-MCP po zbiorze oraz ograniczanie długości obrotu detalicznego, szczególnie gdy celem jest zachowanie wysokiej jędrności jabłek i ich TA (Hasan i in., 2024; Weigl i in., 2026). Transport – choć istotny – powinien być traktowany przede

wszystkim jako element stabilizacji warunków (temperatura, wilgotność), a nie jako główny czynnik determinujący parametry jakości w porównaniu z terminem zbioru i czasem ekspozycji owoców w warunkach obrotu detalicznego (Hasan i in., 2024).

W kolejnych badaniach zasadne byłoby uwzględnienie aspektów sensorycznych oraz parametrów strat masy (ubytków naturalnych wynikających z intensywności oddychania i transpiracji) jako elementu łączącego logistykę z jakością owoców. Równocześnie warto pogłębić analizę interakcji „rok (warunki atmosferyczne) × zróżnicowany stan fizjologiczny jabłek w czasie zbioru × kombinacje z 1-MCP”, ponieważ przebieg warunków pogodowych – zwłaszcza niedobór opadów – może przesunąć punkt równowagi między potencjałem jakościowym a dynamiką starzenia pozbiorniczego, co w literaturze uznawane jest za istotny czynnik kształtujący jakość jabłek (Tao i in., 2022; Do i in., 2024).

7. Wnioski

1. Termin zbioru oraz czas zastosowania 1-MCP stanowią kluczowe czynniki determinujące stabilność jakości jabłek odmiany ‘Gala Schniga’ zarówno po przechowywaniu, jak i w trakcie symulowanego obrotu detalicznego.
2. Pozbiornicze zastosowanie 1-MCP najskuteczniej ogranicza procesy zależne od etylenu, spowalniając utratę jędrności i kwasowości jabłek, ograniczając wzrost zawartości ACC oraz stabilizując proporcję zawartości ekstraktu do kwasowości (SSC/TA) w wydłużonym łańcuchu przechowalnicylogistycznym.
3. Przedzbiornicze zastosowanie preparatu Harvista™ cechuje się niższą skutecznością oraz większą wrażliwością na czynniki związane z warunkami przechowywania i organizacją łańcucha logistycznego w porównaniu z pozbiorniczym zastosowaniem preparatu SmartFresh™. Efektywność działania preparatu Harvista™ ulega ponadto obniżeniu wraz z wydłużaniem okresu przechowywania owoców, a także w przypadku opóźnienia terminu zbioru.
4. Opóźnienie terminu zbioru pogarsza stabilność jakości jabłek po przechowywaniu, prowadząc do wyraźniejszego spadku ich jędrności i kwasowości oraz do wzrostu zawartości ekstraktu i wartości SSC/TA, co zwiększa ryzyko skrócenia trwałości handlowej w podwyższonej temperaturze (25°C) na rynku krajów o ciepłym klimacie.

5. Wydłużenie czasu przechowywania oraz symulowanego obrotu detalicznego konsekwentnie pogarsza parametry jakościowe jabłek (spadek jędrności i kwasowości, wzrost zawartości ekstraktu oraz wartości SSC/TA), przy czym pozbiorcze zastosowanie związku 1-MCP znacząco ogranicza skalę tych zmian.
6. Wpływ samej technologii niskotlenowej (ULO vs quasi-DKA) jest mniejszy niż efekt terminu zbioru i terminu zastosowania 1-MCP, co sugeruje, że kontrola aktywności etylenu odgrywa kluczową rolę w utrzymaniu jakości jabłek, a wybór warunków niskotlenowych pełni funkcję uzupełniającą.

7.1. Zalecenia praktyczne

1. W produkcji jabłek ukierunkowanej przede wszystkim na daleki eksport i długi obrót towarowy podstawowym zabiegiem utrzymania jakości powinno być pozbiorcze zastosowanie 1-MCP, pełniące funkcję elementu „domykającego” technologii po zbiorze.
2. Należy minimalizować opóźnienia w terminie zbioru, gdyż powodują one zwiększone ryzyko przyspieszonej utraty jędrności jabłek i kwasowości zarówno po przechowywaniu, jak i w trakcie obrotu detalicznego na rynku krajów o gorącym klimacie.
3. Zastosowanie preparatu Harvista™ powinno być traktowane jako rozwiązanie wspomagające, szczególnie przy zbiorze jabłek w terminie optymalnym i w krótszych łańcuchach dystrybucji; w scenariuszach wymagających długotrwałego przechowywania lub dalekiego eksportu nie powinno pełnić roli jedyne narzędzia zapewniającego wysoką jakość owoców.
4. W przypadku najbardziej obciążających wariantów postępowania z jabłkami (długotrwałe przechowywanie i transport oraz wydłużony okres obrotu hurtowo-detalicznego) zaleca się stosowanie strategii łączonej Harvista™ + SmartFresh™, szczególnie gdy zbiór może być opóźniony lub przy długim okresie przechowywania, w celu skutecznego ograniczenia procesów zależnych od etylenu i utrzymania wysokiej jakości owoców.
5. W planowaniu logistyki szczególnie istotne jest skracanie czasu obrotu owoców na rynku docelowym, ponieważ etap ten w największym stopniu determinuje tempo utraty jakości, niezależnie od prawidłowości wcześniejszego przechowywania i transportu.

8. Weryfikacja hipotez

Hipotezy główne

HG1. *Jakość jabłek odmiany 'Gala Schniga' zależy od terminu zbioru, terminu zastosowania 1-MCP oraz technologii i czasu przechowywania, przy czym pozbiorcze stosowanie 1-MCP wpływa silniej na utrzymanie jakości owoców niż aplikacja przedzbiorcza.*

Ocena: hipoteza została **potwierdzona**. We wszystkich zestawionych wnioskach wyraźnie uwidacznia się dominująca rola pozbiorczego zastosowania 1-MCP w utrzymaniu jędrności jabłek i kwasowości oraz w ograniczaniu zawartości ACC, podczas gdy efekt stosowania preparatu Harvista™ jest ograniczony i silnie zależny od innych czynników pozbiorczych.

HG2. *Zastosowanie 1-MCP, termin zbioru oraz długość transportu istotnie modyfikują parametry jakościowe jabłek eksportowanych na odległe rynki, również po długotrwałym przechowywaniu.*

Ocena: hipoteza w **dużej części potwierdzona**. Termin zbioru oraz zastosowanie 1-MCP (szczególnie pozbiorcze, a w przypadku dalekiego eksportu także w połączeniu ze stosowaniem przedzbiorczym) okazały się czynnikami kluczowymi. Wpływ długości transportu był istotny jedynie w scenariuszach długiego łańcucha dystrybucyjnego, natomiast w części wyników (PIV) jego znaczenie było drugorzędne w porównaniu z długością przechowywania i okresem symulowanego obrotu detalicznego.

Hipotezy szczegółowe

HS1. *Pozbiorcze zastosowanie związku 1-MCP skuteczniej ogranicza spadek jędrności, kwasowości i zawartość ACC niż przedzbiorcze stosowanie.*

Ocena: **potwierdzona** (PI, PII, PIV).

HS2. *Termin zbioru (optymalny vs. opóźniony) istotnie modyfikuje parametry jakościowe jabłek po przechowywaniu i okresie symulowanego obrotu.*

Ocena: **potwierdzona** (PI, PII, PIII, PIV).

HS3. *Wydlużenie czasu przechowywania pogarsza jakość jabłek niezależnie od terminu zastosowania 1-MCP.*

Ocena: **potwierdzona** – obserwowany trend pogarszania się jakości wraz z wydłużaniem czasu przechowywania i długości symulowanego obrotu detalicznego jest spójny, przy czym jego intensywność może być istotnie ograniczona przez pozbiorcze zastosowanie 1-MCP (PII, PIV).

HS4. *Technologia quasi-DKA efektywniej niż ULO ogranicza spadek jędrności i kwasowości oraz wzrost zawartości ACC podczas długotrwałego przechowywania.*

Ocena: nie w pełni potwierdzona na podstawie sformułowanych wniosków. Analiza wyników z pracy PII wskazuje, że warunki ULO i quasi-DKA wywierały porównywalny wpływ na większość badanych parametrów, zwłaszcza przy równoczesnym zastosowaniu inhibitora etylenu. Brak wyraźnych różnic między tymi technologiami osłabia tezę o jednoznacznej przewadze quasi-DKA nad ULO w badanych warunkach.

HS5. *Kombinacja przed- i pozbiorniczego zastosowania 1-MCP jest najskuteczniejszą metodą utrzymania jędrności jabłek po długotrwałym transporcie i wydłużonym obrocie hurtowo-detalicznym, niezależnie od terminu zbioru i długości przechowywania.*

Ocena: w dużej części potwierdzona, z istotnym doprecyzowaniem: wyniki pracy PIII wykazały wysoką skuteczność kombinacji przed- i pozbiorniczego zastosowania 1-MCP, również przy zbiorze opóźnionym. Preparat SmartFresh™ stosowany samodzielnie również zapewniał utrzymanie wymaganej jędrności w wybranych scenariuszach, np. przy dłuższym przechowywaniu i różnych długościach transportu. Określenie „najskuteczniejsza” odnosi się zatem do strategii najbardziej niezawodnej w warunkach najwyższego ryzyka utraty jakości.

9. Bibliografia

1. Akcay U.C., Baloglu M.C., Altunoglu Y.C., Baloglu P., Koyuncu M.A., Erbas D., Horuz E., Arslan B., Turkoglu S. 2025. Comparative transcriptomic analysis provides novel insights on the hormonal regulation of postharvest apples under cold storage. *Hortic. Environ. Biotechnol.* doi: 10.1007/s13580-025-00710-1
2. Al Shoffe Y., Rudell D., Park D., Aigul B.E., Qin M., Shi M., Dando R., Watkins C.B. 2024. Aroma volatiles and sensory quality of organically-grown apple cultivars after dynamic controlled atmosphere (DCA) storage and comparison with CA-stored fruit with and without 1-methylcyclopropene (1-MCP). *Postharvest Biol. Technol.* 218: 113162. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113162
3. Argenta L.C., do Amarante C.V.T., de Freitas S.T., Brancher T.L., Nesi C.N., Mattheis J.P. 2022. Fruit quality of ‘Gala’ and ‘Fuji’ apples cultivated under different environmental conditions. *Sci. Hortic.* 303: 111195. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111195
4. Bai J., Baldwin E.A., Goodner K.L., Mattheis J.P., Brecht J.K. 2005. Response of four apple cultivars to 1-methylcyclopropene treatment and controlled atmosphere storage. *HortScience* 40(5): 1534–1538. doi: 10.21273/hortsci.40.5.1534
5. Baswal A.K., Ramezani A. 2020. 1-methylcyclopropene potentials in maintaining the postharvest quality of fruits, vegetables, and ornamentals: A review. *J. Food Process. Preserv.* doi: 10.1111/jfpp.15129
6. Bejaei M., Stanich K., Cliff M.A. 2021. Modelling and classification of apple textural attributes using sensory, instrumental and compositional analyses. *Foods* 10(2): 384. doi: 10.3390/foods10020384
7. Bekele E.A., Beshir W.F., Hertog M.L.A.T.M., Nicolai B.M., Geeraerd A.H. 2015. Metabolic profiling reveals ethylene mediated metabolic changes and a coordinated adaptive

- mechanism of 'Jonagold' apple to low oxygen stress. *Physiol. Plant.* 155(3): 232–247. doi: 10.1111/ppl.12351
8. Bessemans N., Verboven P., Verlinden B.E., Nicolaï B.M. 2016. A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA). *Postharvest Biol. Technol.* 115: 91–102. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.12.019
 9. Blankenship S.M., Dole J.M. 2003. 1-methylcyclopropene: A review. *Postharvest Biol. Technol.* 28(1): 1–25. doi: 10.1016/S0925-5214(02)00246-6
 10. Błaszczuk J., Gasparski K. 2019. Influence of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the quality and storability of 'Red Jonaprince' apples stored in different conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 8(6): 7–15. doi: 10.24326/asphc.2019.6.1
 11. Boschiero M., Zanotelli D., Ciarapica F.E., Fadanelli L., Tagliavini M. 2019. Greenhouse gas emissions and energy consumption during the post-harvest life of apples as affected by storage type, packaging and transport. *J. Clean. Prod.* 220: 45–56. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.300
 12. Both V., Brackmann A., Thewes F.R., Weber A., Schultz E.E., Ludwig V. 2018. The influence of temperature and 1-MCP on quality attributes of 'Galaxy' apples stored in controlled atmosphere and dynamic controlled atmosphere. *Food Packag. Shelf Life* 16: 168–177. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.03.010
 13. Both V., Thewes F.R., Brackmann A., de Oliveira Anese R., de Freitas Ferreira D., Wagner R. 2017. Effects of dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on some quality parameters and volatile profile of 'Royal Gala' apple after long-term storage. *Food Chem.* 215: 483–492. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.08.009
 14. Brizzolara S., Manganaris G.A., Fotopoulos V., Watkins C.B., Tonutti P. 2020. Primary metabolism in fresh fruits during storage. *Front. Plant Sci.* 11. doi: 10.3389/fpls.2020.00080
 15. Büchele F., Khera K., Wagner R., Thewes F.R., Neuwald D.A. 2023. Interaction between dynamic controlled atmosphere (DCA-CD), 1-methylcyclopropene and elevated temperatures in the long-term storage of organic 'Santana' apples. *Postharvest Biol. Technol.* 204: 112471. doi: 10.1016/j.postharvbio.2023.112471
 16. Bühlmann A., Rebeaud S.G. 2017. Empfehlungen für die Obstlagerung 2017. *Obstlagerung* 17: 11–14.
 17. Bui T., Stridh H., Molin M. 2021. Influence of weather conditions on the quality of 'Ingrid Marie' apples and their susceptibility to grey mould infection. *J. Agric. Food Res.* 4: 100104. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100104
 18. Cao X., Horváth-Mezőfi Z., Sasvár Z., Szabó G., Gere A., Hitka G., Radványi D. 2025. Influence of visual quality and cultural background on consumer apple preferences: An eye-tracking study with Chinese and Hungarian consumers. *Appl. Sci.* 15(2): 773. doi: 10.3390/app15020773
 19. Çetin N., Karaman K., Kavuncuoğlu E., Yıldırım B., Jahanbakhshi A. 2022. Using hyperspectral imaging technology and machine learning algorithms for assessing internal quality parameters of apple fruits. *Chemometr. Intell. Lab. Syst.* 104650. doi: 10.1016/j.chemolab.2022.104650
 20. Chen B., Mao J., Huang B., Mi B., Liu Y., Hu Z. 2017. Effect of bagging and time of harvest on fruit quality of 'Red Fuji' apple in high altitude area in China. *Fruits* 72(1): 36–46.
 21. Cheng Z., Zhou W., Gong X., Wei X., Li J., Peng Z. 2018. Physicochemical changes of custard apple at different storage temperatures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 392.
 22. Chiriboga M.A., Schotsmans W.C., Larrigaudière C., Dupille E., Recasens I. 2011. How to prevent ripening blockage in 1-MCP-treated 'Conference' pears. *J. Sci. Food Agric.* 91(10): 1781–1788. doi: 10.1002/jsfa.4382
 23. Cliff M.A., Bejaei M. 2018. Inter-correlation of apple firmness determinations and development of cross-validated regression models for prediction of sensory attributes from instrumental and compositional analyses. *Food Res. Int.* 106: 752–762. doi: 10.1016/j.foodres.2018.01.041
 24. Dal Cin V., Rizzini F.M., Botton A., Tonutti P. 2006. The ethylene biosynthetic and signal transduction pathways are differently affected by 1-MCP in apple and peach fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 42(2): 125–133. doi: 10.1016/j.postharvbio.2006.06.008
 25. Dambros J.I., Storch T.T., Pegoraro C., Crizel G.R., Gonçalves B.X., Quecini V., Fialho F.B., Rombaldi C.V., Girardi C.L. 2022. Physicochemical properties and transcriptional

- changes underlying the quality of 'Gala' apples (*Malus x domestica* Borkh.) under atmosphere manipulation in long-term storage. *J. Sci. Food Agric.* doi: 10.1002/jsfa.12169
26. de Candido de Oliveira F., Balzan M.M., Deon B.C., Cordeiro M.W., Batista C.B., Soldateli F.J., Wendt L.M., Thewes F.R., Both V., Brackmann A., Neuwald D.A., Wagner R. 2025. Static and dynamic controlled atmosphere storage and 1-methylcyclopropene treatment of 'Cripps Pink' apples: Linking sensory perception, volatile compounds, and quality. *Food Res. Int.* 116669. doi: 10.1016/j.foodres.2025.116669
 27. DeEll J.R., Ehsani-Moghaddam B. 2010. Preharvest 1-methylcyclopropene treatment reduces soft scald in 'Honeycrisp' apples during storage. *HortScience* 45(3): 414–417. doi: 10.21273/HORTSCI.45.3.414
 28. DeEll J.R., Lum G.B. 2017. Effects of low oxygen storage and 1-methylcyclopropene on storage disorders of 'Empire' apples. *HortScience* 52: 1265–1270. doi: 10.21273/HORTSCI.12240-17
 29. DeEll J.R., Lum G.B., Ehsani-Moghaddam B. 2016. Effects of multiple 1-methylcyclopropene treatments on apple fruit quality and disorders in controlled atmosphere storage. *Postharvest Biol. Technol.* 111: 93–98. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.08.002
 30. DeEll J.R., Lum G.B., Mostofi Y., Lesage S.K. 2022. Timing of ethylene inhibition affects internal browning and quality of 'Gala' apples in long-term low oxygen storage. *Front. Plant Sci.* 13. doi: 10.3389/fpls.2022.914441
 31. Ding X., Zheng Y., Jia R., Li X., Wang B., Zhao Z. 2024. Comparison of fruit texture and storage quality of four apple varieties. *Foods* 13(10): 1563. doi: 10.3390/foods13101563
 32. Do V.G., Lee Y., Park J., Win N.M., Kwon S.-I., Yang S., Kim S. 2024. Heat stress and water irrigation management effects on the fruit color and quality of 'Hongro' apples. *Agriculture* 14(5): 761. doi: 10.3390/agriculture14050761
 33. Doerflinger F.C., Al Shoffe Y., Sutanto G., Nock J.F., Watkins C.B. 2024. Preharvest 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment effects on quality of spot and strip picked 'Gala' apples at harvest and after storage as affected by postharvest 1-MCP and temperature conditioning treatments. *Sci. Hortic.* 325: 112682. doi: 10.1016/j.scienta.2023.112682
 34. Dong X., Huber D.J., Ramírez-Sánchez M., Rao J., Lee J., Watkins C.B. 2014. Cultivar differences in gaseous 1-methylcyclopropene accumulation in whole and fresh-cut apple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 93: 130–134. doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.02.013
 35. FAO. 2023. Fruit consumption by type, World, 1961 to 2021. *Our World in Data*. Available online: <https://ourworldindata.org/grapher/fruit-consumption-by-fruit-type> (dostęp: 2.02.2026).
 36. Fernández-Cancelo P., Muñoz P., Echeverría G., Larrigaudière C., Teixidó N., Munné-Bosch S., Giné-Bordonaba J. 2022. Ethylene and abscisic acid play a key role in modulating apple ripening after harvest and after cold storage. *Postharvest Biol. Technol.* 188: 111902. doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.111902
 37. Forlani S., Masiero S., Mizzotti C. 2019. Fruit ripening: The role of hormones, cell wall modifications, and their relationship with pathogens. *J. Exp. Bot.* 70(11): 2993–3006. doi: 10.1093/jxb/erz112
 38. Fu L., Liu S.Y., Xu F.X. 2017. Effect of treatment with MeJA on physiology and biochemistry in blueberry fruit. *J. Southeast Univ. Nat. Sci. Ed.* 35: 473–475.
 39. Ganai S.A., Ahsan H., Tak A., Mir M.A., Rather A.H., Wani S.M. 2018. Effect of maturity stages and postharvest treatments on physical properties of apple during storage. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 17(3): 310–316. doi: 10.1016/j.jssas.2016.07.001
 40. Gasser F., Dätwyler D., Schneider K., Naunheim W., Hoehn E. 2005. Effects of decreasing oxygen levels in the storage atmosphere on the respiration and production of volatiles of 'Idared' apples. *Acta Hortic.* 682: 1585–1592. doi: 10.17660/ActaHortic.2005.682.211
 41. Gasser F., Rebeaud S. 2015. Fruit quality as affected by 1-MCP treatment and DCA storage – a comparison of the two methods. *Eur. J. Hortic. Sci.* 80: 18–24. doi: 10.17660/EJHS.2015/80.1.3
 42. Grabska J., Beć K.B., Ueno N., Huck C.W. 2023. Analyzing the quality parameters of apples by spectroscopy from Vis/NIR to NIR region: A comprehensive review. *Foods* 12(10): 1946. doi: 10.3390/foods12101946
 43. Guo J., Wei X., Lü E., Wang Y., Deng Z. 2020. Ripening behavior and quality of 1-MCP treated d'Anjou pears during controlled atmosphere storage. *Food Control* 117: 107364. doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107364

44. Gwanpua S.G., Verlinden B.E., Hertog M.L., Nicolai B.M., Geeraerd A.H. 2017a. A mechanistic modelling approach to understand 1-MCP inhibition of ethylene action and quality changes during ripening of apples. *J. Sci. Food Agric.* 97(11): 3802–3813. doi: 10.1002/jsfa.8244
45. Gwanpua S.G., Verlinden B.E., Hertog M.L.A.T.M., Nicolai B.M., Geeraerd A.H. 2017b. A conceptual model of the inhibitory effect of 1-methylcyclopropene on ripening of apples. *Acta Hort.* 1154: 41–46. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1154.6
46. Harker F.R., Gunson F.A., Jaeger S.R. 2003. The case for fruit quality: An interpretive review of consumer attitudes, and preferences for apples. *Postharvest Biol. Technol.* 28(3): 333–347. doi: 10.1016/S0925-5214(02)00215-6
47. Harker F.R., Kupferman E.M., Marin A.B., Gunson F.A., Triggs C.M. 2008. Eating quality standards for apples based on consumer preferences. *Postharvest Biol. Technol.* 50(1): 70–78. doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.03.020
48. Hasan M.U., Singh Z., Shah H.M.S., Kaur J., Woodward A. 2024. Water loss: A postharvest quality marker in apple storage. *Food Bioprocess Technol.* doi: 10.1007/s11947-023-03305-9.
49. Hoehn E., Gasser F., Guggenbuehl B., Casutt M. 2003a. Consumer demands on eating quality of apples: Minimum requirements on firmness, soluble solids and acidity. *Acta Hort.* 600: 693–696. doi: 10.17660/ActaHortic.2003.600.104
50. Hoehn E., Gasser F., Guggenbühl B., Künsch U. 2003b. Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharvest Biol. Technol.* 27(1): 27–37. doi: 10.1016/S0925-5214(02)00190-4
51. Hu B., Sun D.-W., Pu H., Wei Q. 2019. Recent advances in detecting and regulating ethylene concentrations for shelf-life extension and maturity control of fruit: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 91: 66–82. doi: 10.1016/j.tifs.2019.06.010
52. Hu Y., Han Z., Sun Y., Wang S., Wang T., Wang Y., Xu K., Zhang X., Xu X., Han Z., Wu T. 2020. ERF4 affects fruit firmness through TPL4 by reducing ethylene production. *Plant J.* 103(3): 937–950. doi: 10.1111/tpj.14884
53. Huber D.J., Hurr B.M., Lee J.S., Lee J.H. 2010. 1-methylcyclopropene sorption by tissues and cell-free extracts from fruits and vegetables: Evidence for enzymic 1-MCP metabolism. *Postharvest Biol. Technol.* 56(2): 123–130. doi: 10.1016/j.postharvbio.2010.01.006
54. Hueppe R., Zander K. 2023. Perfect apples or sustainable production?—Consumer perspectives from Germany. *J. Consum. Behav.* doi: 10.1002/cb.2236
55. Internet: The Apple market in the EU: Vol. 1: Production, areas and yields. 2022. Available online: https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2022-10/apples-production_en.pdf (accessed on 4.02.2026).
56. Ireland H.S., Gunaseelan K., Muddumage R., Tacken E.J., Putterill J., Johnston J.W., Schaffer R.J. 2014. Ethylene regulates apple (*Malus × domestica*) fruit softening through a dose × time-dependent mechanism and through differential sensitivities and dependencies of cell wall-modifying genes. *Plant Cell Physiol.* 55(5): 1005–1016. doi: 10.1093/pcp/pcu034
57. Jaeger S.R., Antúnez L., Ares G., Swaney-Stueve M., Jin D., Harker F.R. 2018. Quality perceptions regarding external appearance of apples: Insights from experts and consumers in four countries. *Postharvest Biol. Technol.* 146: 99–107. doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.08.014
58. Jha S.N., Rai D.R., Sharma R. 2011. Physico-chemical quality parameters and overall quality index of apple during storage. *J. Food Sci. Technol.* 49: 594–600.
59. Johnston J.W., Hewett E.W., Hertog M.L.A.T.M. 2002. Postharvest softening of apple (*Malus domestica*) fruit: A review. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 30(3): 145–160. doi: 10.1080/01140671.2002.9514210
60. Juhņeviča-Radenkova K., Radenkova V. 2016. Influence of 1-methylcyclopropene and ULO conditions on sensory characteristics of apple fruit grown in Latvia. *J. Hortic. Res.* 24(1): 37–46. doi: 10.1515/johr-2016-0005
61. Keller-Przybyłkiewicz S., Lewandowski M., Kuras A., Strączyńska K., Czarnecka R., Idczak B., Rutkowski K.P., Skorupińska A. 2025. Interactions between seasonal temperature changes, activities of selected genes and fruit quality in *Malus domestica* Borkh. *Agronomy* 15(4): 908. doi: 10.3390/agronomy15040908

62. Khalifeh P., Sadar N., Panarese A., Stürz S., Ebner I., Zanella A., Costa F. 2025. Texture and volatile profiling of four modern apple cultivars stored using ultra-low oxygen, 1-MCP and dynamic controlled atmosphere strategies. *Postharvest Biol. Technol.* 229: 113718. doi: 10.1016/j.postharvbio.2025.113718
63. Khazaeli S., Jabalameli M.S., Sahebi H. 2023. Bi-objective model for multi-level supply chain by focusing on quality of agricultural products: a case study. *Kybernetes*. doi: 10.1108/K-05-2022-0745
64. Khera K., Büchele F., Wood R.M., Thewes F.R., Wagner R., Hagemann M.H., Neuwald D.A. 2024. Impact of different storage conditions with combined use of ethylene blocker on 'Shalimar' apple variety. *Sci. Rep.* 14(1). doi: 10.1038/s41598-024-57688-6
65. Kondo S., Setha S., Rudell D.R., Buchanan D.A., Mattheis J.P. 2005. Aroma volatile biosynthesis in apples affected by 1-MCP and methyl jasmonate. *Postharvest Biol. Technol.* 36(1): 61–68. doi: 10.1016/j.postharvbio.2004.11.005
66. Korićanac A., Miletić N., Popović B., Mitrović O., Lukić M., Pešaković M., Tomić J. 2019. The effect of ULO and NA storage on changes in the quality of apple fruit (*Malus domestica* Borkh.) during shelf life. *Agronomy* 10(1): 25. doi: 10.3390/agronomy10010025
67. Kwon Y.-S., Park J.-T., Yoo J., Do V.G., Kim J.-H., Cho Y.S., Yang S., Kang I.-K., Win N.M. 2024. 1-methylcyclopropene improves the postharvest physiological characteristics and fruit quality of 'Colorpple' and 'Manhong' apple cultivars during storage at warm and cold temperatures. *Hortic. Sci. Technol.* 42(2): 151–166. doi: 10.7235/hort.20240013
68. Lachapelle M., Bourgeois G., DeEll J.R. 2013. Effects of preharvest weather conditions on firmness of 'McIntosh' apples at harvest time. *HortScience* 48(4): 474–480. doi: 10.21273/HORTSCI.48.4.474
69. Lee J., Kang I.-K., Nock J.F., Watkins C.B. 2019. Effects of preharvest and postharvest applications of 1-methylcyclopropene on fruit quality and physiological disorders of 'Fuji' apples during storage at warm and cold temperatures. *HortScience* 54(8): 1375–1383. doi: 10.21273/HORTSCI.54.8.1375
70. Li R., Wang Y., Li W., Shao Y. 2023. Comparative analyses of ripening, texture properties and cell wall composition in three tropical fruits treated with 1-methylcyclopropene during cold storage. *Horticulturae* 9(2): 126. doi: 10.3390/horticulturae9020126
71. Li Z., Liu Y., Gao Y., Chen J., Liu M., Bouzayen M., Su D., Tang M. 2020. The molecular regulation of ethylene in fruit ripening. *Small Methods* 4: 1900485. doi: 10.1002/smt.201900485
72. Ludwig V., Thewes F.R., Brackmann A., Both V., Wagner R., Mallmann Wendt L., Pasquetti Berghetti M.R., dos Santos I.D., Soldateli F.J. 2022. Volatile compounds profile and quality of 'Cripps Pink' apple: Impact of dynamic controlled atmosphere combined with delayed storage and 1-MCP treatment. *J. Food Process. Preserv.* doi: 10.1111/jfpp.17184
73. Lysiak G.P., Kurlus R., Michalska A. 2016. Increasing the frost resistance of 'Golden Delicious', 'Gala' and 'Šampion' apple cultivars. *Folia Hort.* 28: 125–135. doi: 10.1515/fhort-2016-0015
74. Lysiak G.P., Rutkowski K., Walkowiak-Tomeczak D. 2021. Effect of storage conditions on storability and antioxidant potential of pears cv. 'Conference'. *Agriculture* 11(6): 545. doi: 10.3390/agriculture11060545
75. Małachowska M., Tomala K. 2022. Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of 'Gala Schniga'® SchniCo Red(s) apples during long-term storage. *Agriculture* 12(12): 2073. doi: 10.3390/agriculture12122073
76. Małachowska M., Tomala K. 2023. Apple quality during shelf-life after long-term storage and simulated transport. *Agriculture* 13(11): 2045. doi: 10.3390/agriculture13112045
77. Małachowska M., Tomala K. 2025. Determinants of postharvest quality in 'Gala Schniga'® SchniCo Red(s) apples: The role of harvest date, storage duration, and 1-MCP application. *Agriculture* 15(22): 2363. doi: 10.3390/agriculture15222363
78. Mateo-Fornés J., Soto-Silva W., González-Araya M.C., Plà-Aragonès L.M., Solsona-Tehas F. 2021. Managing quality, supplier selection, and cold-storage contracts in agrifood supply chain through stochastic optimization. *Int. Trans. Oper. Res.* doi: 10.1111/itor.13069
79. Mattheis J.P. 2008. How 1-methylcyclopropene has altered the Washington State apple industry. *HortScience* 43(1): 99–101. doi: 10.21273/hortsci.43.1.99

80. McArtney S.J., Obemiller J.D., Schopp J.R., Parke M.L., Edgington T.B. 2008. Preharvest 1-methylcyclopropene delays fruit maturity and reduces softening and superficial scald of apples during long-term storage. *HortScience* 43: 366–371.
81. McCormick R., Kitemann D. 2015. Effect of high temperature and 1-MCP application or dynamic controlled atmosphere on energy savings during apple storage. *Eur. J. Hortic. Sci.* 80: 33–38. doi: 10.17660/EJHS.2015/80.1.5
82. Mditshwa A., Fawole O.A., Opara U.L. 2018. Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples. *Food Packag. Shelf Life* 16: 59–68. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.01.011
83. Mohebi M., Babalar M., Askari M.A., Talaei A., Barker A. 2017. Effects of harvest date on apple fruit quality at harvesting and after cold storage. *Int. J. Hortic. Sci. Technol.* 4(1): 21–27. doi: 10.22059/ijhst.2018.210156.134
84. Mou Y., Yang X., Zhang Y., Qi D., Tian L., Huo H., Yin C., Liu C., Dong X., Xu J., Li N. 2025. Identification and evaluation of flesh texture of crisp pear fruit based on penetration test using texture analyzer. *Horticulturae* 11: 359. doi: 10.3390/horticulturae11040359
85. Musacchi S., Serra S. 2018. Apple fruit quality: Overview on pre-harvest factors. *Sci. Hortic.* 234: 409–430. doi: 10.1016/j.scienta.2017.12.057
86. Nguyen T., Hertog M., Van De Poel B., Tran D., Nicolaï B. 2023. Targeted system approach to ethylene biosynthesis and signaling of a heat-tolerant tomato cultivar; the impact of growing season on fruit ripening. *Front. Plant Sci.* 14: 1195020. doi: 10.3389/fpls.2023.1195020
87. Nikitin A., Makarkina M. 2019. Effect of meteorological conditions on storability of the scab-immune columnar apple varieties. *Food Process.: Tech. Technol.* 545–554. doi: 10.21603/2074-9414-2019-4-545-554
88. O'Neil C.E., Nicklas T.A., Fulgoni V.L. 2015. Consumption of apples is associated with a better diet quality and reduced risk of obesity in children: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003–2010. *Nutr. J.* 14: 1–9.
89. Onursal C., Koyuncu M.A. 2021. Role of controlled atmosphere, ultralow oxygen or dynamic controlled atmosphere conditions on quality characteristics of 'Scarlet Spur' apple fruit. *Tarım Bilimleri Derg.* : 267–275. doi: 10.15832/ankutbd.631956
90. Péneau S., Hoehn E., Roth H.-R., Escher F., Nuessli J. 2006. Importance and consumer perception of freshness of apples. *Food Qual. Prefer.* 17: 9–19.
91. Pirrello J., Liu M., Chervin C., Roustan J., Bouzayen M. 2015. Ethylene control of fruit ripening: Revisiting the complex network of transcriptional regulation. *Plant Physiol.* 169: 2380–2390. doi: 10.1104/pp.15.01361
92. Pre-Aymard C., Fallik E., Weksler A., Lurie S. 2005. Sensory analysis and instrumental measurements of 'Anna' apples treated with 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biol. Technol.* 36: 135–142.
93. Radović I., Radović A., Savić S., Marjanović M., Jovanović Z. 2023. Morphological and quality attributes of selected autochthonous apple genotypes from Serbia. *AgroReS.* doi: 10.7251/zars2301092r
94. Ramón A., José P., Santiago L., Ramiro A. 2024. Strategies to delay ethylene-mediated ripening in climacteric fruits: Implications for shelf life extension and postharvest quality. *Horticulturae* 10: 840. doi: 10.3390/horticulturae10080840
95. Rupasinghe H.P.V., Murr D.P., Paliyath G., Skog L. 2000. Inhibitory effect of 1-MCP on ripening and superficial scald development in 'McIntosh' and 'Delicious' apples. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75(3): 271–276.
96. Sanad Alsbu R.A., Yarlagadda P., Karim A. 2023. An empirical model for predicting the fresh food quality changes during storage. *Foods* 12(11): 2113. doi: 10.3390/foods12112113
97. Satekge T.S., Magwaza L.S. 2022. Postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on climacteric fruits: Factors affecting efficacy. *Int. J. Fruit Sci.* 22: 595–607.
98. Schultz E.E., Thewes F.R., Wendt L.M., Brackmann A., Both V., Ludwig V., Soldateli F.J., Wagner R. 2023. Extremely low oxygen with different hysteresis and dynamic controlled atmosphere storage: Impact on overall quality and volatile profile of 'Maxi Gala' apple. *Postharvest Biol. Technol.* 205: 112527. doi: 10.1016/j.postharvbio.2023.112527
99. Sharma M., Negi S., Kumar P., Srivastava D., Choudhary M., Irfan M. 2023. Fruit ripening under heat stress: The intriguing role of ethylene-mediated signaling. *Plant Sci.* 111820. doi: 10.1016/j.plantsci.2023.111820

100. Shin J., Park H., Song J., Lee K., Cho T., Kim H., Han H. 2023. Advances in the strategic approaches of pre- and post-harvest treatment technologies for peach fruits (*Prunus persica*). *Horticulturae* 9: 315. doi: 10.3390/horticulturae9030315
101. Shoji K., Schudel S., Shrivastava C., Onwude D., Defraeye T. 2022. Optimizing the postharvest supply chain of imported fresh produce with physics-based digital twins. *J. Food Eng.* 329: 111077. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111077
102. Shukla M., Jharkharia S. 2013. Agri-fresh produce supply chain management: A state-of-the-art literature review. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 33(2): 114–158. doi: 10.1108/01443571311295608
103. Sidhu R.S., Bound S.A., Hunt I., Swarts N.D. 2024. Impact of pre-harvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruit quality, physiological disorders and respiration rate of 'Scilate' apple. *Hortic. Environ. Biotechnol.* doi: 10.1007/s13580-024-00616-4
104. Soldateli F.J., Batista C.B., Pinto B.R.C., Wendt L.M., Deon B.C., Ludwig V., Thewes F.R., Steffens C.A., Brackmann A., Both V. 2025. Interaction of nitric oxide and extremely low oxygen storage on volatile organic compounds and overall quality of 'Maxi Gala' apples. *Postharvest Biol. Technol.* 222: 113374. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113374
105. Sredojevic A., Radivojevic D., Levic S.M., Aksic M.F., Milivojevic J., Djekic I. 2024. Effects of the fruit harvest date and shelf-life nexus of apples on different quality perspectives. *Appl. Sci.* 14(24): 11737. doi: 10.3390/app142411737
106. Sredojevic A., Radivojevic D., Levic S.M., Fotiric Aksic M., Milivojevic J., Djordjevic M., Spasojevic S., Djekic I. 2025. Postharvest quality of Granny Smith apples: Interplay of harvest stage, storage duration, and shelf-life. *Horticulturae* 11(8): 868. doi: 10.3390/horticulturae11080868
107. Steffens C.A., Soardi K., Heinzen A.S., Amaral Vignali Alves J., Silva J.C., Talamini do Amarante C.V., Brackmann A. 2021. Quality of 'Cripps Pink' apples following the application of 1-MCP, ethanol vapor and nitric oxide as pretreatments for controlled atmosphere storage. *J. Food Process. Preserv.* 46: 1–8. doi: 10.1111/jfpp.16121
108. Stürz S., Sadar N., Folie I., Zanella A. 2024. The impact of DCA-CF, 1-MCP and waxing on apple quality under simulated extreme transport and shelf life conditions. *Acta Hortic.* 1386: 87–94. doi: 10.17660/ActaHortic.2024.1386.12
109. Sun Y., Shi Z., Jiang Y., Zhang X., Li X., Li F. 2021. Effects of preharvest regulation of ethylene on carbohydrate metabolism of apple (*Malus domestica* Borkh cv. Starkrimson) fruit at harvest and during storage. *Sci. Hortic.* 276: 109748. doi: 10.1016/j.scienta.2020.109748
110. Sutormina A., Nazarov Y., Gudkovsky V., Kozhina L. 2021. Sustainability of apple fruits cv. Berkutovskoye to physiological diseases under different storage technologies. *E3S Web Conf.* 254: 02025. doi: 10.1051/E3SCONF/202125402025
111. Tao H., Sun H., Wang Y., Wang X., Guo Y. 2022. Effects of water stress on quality and sugar metabolism in 'Gala' apple fruit. *Hortic. Plant J.* doi: 10.1016/j.hpj.2022.03.008
112. Tatsuki M., Endo A., Ohkawa H. 2007. Influence of time from harvest to 1-MCP treatment on apple fruit quality and expression of genes for ethylene biosynthesis enzymes and ethylene receptors. *Postharvest Biol. Technol.* 43(1): 28–35. doi: 10.1016/j.postharvbio.2006.08.010
113. Thamwong M., Arakawa O. 2007. Starch degradation of detached apple fruit in relation to ripening and ethylene. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 76: 345–350.
114. Thewes F.R., Anese R.O., Ludwig V., Klein B., Wagner R., Nora F.R., Rombaldi C.V., Brackmann A. 2020. Dynamic controlled atmosphere (DCA) and 1-MCP: Impact on volatile esters synthesis and overall quality of 'Galaxy' apples. *Food Packag. Shelf Life* 26: 100563. doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100563
115. Thewes F.R., Both V., Brackmann A., Weber A., de Oliveira Anese R. 2015. Dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen storage on 'Gala' mutants quality maintenance. *Food Chem.* 188: 62–70. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.04.128
116. Thewes F.R., Brackmann A., Both V., Weber A., Anese R.d.O., Ferrão T.d.S., Wagner R. 2017. The different impacts of dynamic controlled atmosphere and controlled atmosphere storage in the quality attributes of 'Fuji Suprema' apples. *Postharvest Biol. Technol.* 130: 7–20. doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.04.003
117. Thewes F.R., Wood R.M., Both V., Keshri N., Geyer M., Pansera-Espindola B., Hagemann M.H., Brackmann A., Wünsche J.N., Neuwald D.A. 2021. Dynamic controlled atmosphere:

- A review of methods for monitoring fruit responses to low oxygen. *Comunicata Sci.* 12: e3782. doi: 10.14295/cs.v12.3782
118. Thongkum M., McAtee P.M., Schaffer R.J., Allan A.C., Ketsa S. 2018. Characterization and differential expression of ethylene receptor genes during fruit development and dehiscence of durian (*Durio zibethinus*). *Sci. Hortic.* 240: 623–630. doi: 10.1016/j.scienta.2018.06.052
 119. Ting V.J.L., Silcock P., Biasioli F., Bremer P. 2023. The physical and structural effects of 1-MCP on four different apple cultivars during storage. *Foods* 12(22): 4050. doi: 10.3390/foods12224050
 120. Tipu M.M.H., Sherif S.M. 2024. Ethylene and its crosstalk with hormonal pathways in fruit ripening: Mechanisms, modulation, and commercial exploitation. *Front. Plant Sci.* 15: 1475496. doi: 10.3389/fpls.2024.1475496
 121. Toivonen P.M.A., Lu C.W. 2005. Studies on elevated temperature, short-term storage of 'Sunrise' summer apples using 1-MCP to maintain quality. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80: 439–446.
 122. Tomala K., Grzęda M., Guzek D., Głąbska D., Gutkowska K. 2020a. The effects of preharvest 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on the fruit quality parameters of cold-stored 'Szampion' cultivar apples. *Agriculture* 10(3): 80. doi: 10.3390/agriculture10030080
 123. Tomala K., Grzęda M., Guzek D., Głąbska D., Gutkowska K. 2020b. Analysis of possibility to apply preharvest 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment to delay harvesting of Red Jonaprince apples. *Sustainability* 12(11): 4575. doi: 10.3390/su12114575
 124. Tomala K., Guzek D., Głąbska D., Małachowska M., Krupa T., Gutkowska K. 2021. The influence of 1-methylcyclopropene on the quality parameters of Idared apples after 8 weeks of storage simulating long-distance transportation. *Agronomy* 11(3): 528. doi: 10.3390/agronomy11030528
 125. Tomala K., Guzek D., Głąbska D., Małachowska M., Widlak L., Krupa T., Gutkowska K. 2022. Maintaining the quality of 'Red Jonaprince' apples during storage by 1-methylcyclopropene preharvest and postharvest treatment. *Agriculture* 12(8): 1189. doi: 10.3390/agriculture12081189
 126. Tomala K., Guzek D., Głąbska D., Małachowska M., Widlak L., Krupa T., Gutkowska K. 2023. Assessment of the quality of 'Red Jonaprince' apples during storage after delayed harvesting and 1-methylcyclopropene (1-MCP) preharvest and postharvest treatment. *Agronomy* 13: 1730. doi: 10.3390/agronomy13071730
 127. Tomala K., Małachowska M., Guzek D., Głąbska D., Gutkowska K. 2020c. The effects of 1-methylcyclopropene treatment on the fruit quality of 'Idared' apples during storage and transportation. *Agriculture* 10: 490. doi: 10.3390/agriculture10110490
 128. Trajner M., Dyngus M. 2013. Krajowa produkcja, spożycie oraz promocja owoców i warzyw. Agencja Rynku Rolnego, Biuletyn Informacyjny 3: 6–27. (FAOSTAT: www.faostat.fao.org, dostęp: 4 luty 2026).
 129. Tucker G., Yin X., Zhang A., Wang M., Zhu Q., Liu X., Xie X., Chen K., Grierson D. 2017. Ethylene and fruit softening. *Food Qual. Saf.* 1(4): 253–267. doi: 10.1093/fqsafe/fyx024
 130. Tuna Güneş N., Horzum Ö. 2024. Influence of storage technology and 1-methylcyclopropene on postharvest behavior of 'Ankara' pear. *Turk. J. Agric. For.* 48(1): 81–94. doi: 10.55730/1300-011x.3164
 131. Veltman R.H., Verschoor J.A., van Dugteren J.H.R. 2003. Dynamic control system (DCS) for apples (*Malus domestica* Borkh. cv 'Elstar'): Optimal quality through storage based on product response. *Postharvest Biol. Technol.* 27(1): 79–86. doi: 10.1016/S0925-5214(02)00186-2
 132. Villalobos-Acuña M.G., Biasi W.V., Flores S., Mitcham E.J., Elkins R.B., Willits N.H. 2010. Preharvest application of 1-methylcyclopropene influences fruit drop and storage potential of 'Bartlett' pears. *HortScience* 45: 610–616.
 133. Walter H., Lieth H., Rehder H., Harnickell E. 1960. Klimadiagramm-weltatlas. Jena: G. Fischer. p. 103.
 134. Wang M., Zhan W., Chen M., Guo Y., Wang H., Wu Y., Bai T., Jiao J., Song C., Shi J., Wan R., Zhang K., Hao P., Liu Y., Zhao Y., Chen L., Song S., Feng J., Zheng X. 2024. MdAP2-like, a new regulator in apple, simultaneously modulates fruit softening and size. *Postharvest Biol. Technol.* 217: 113123. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113123
 135. Wang W., Ge Y., Bai L., Li J., Han X., Zhang M., Lv J. 2020. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the expression of genes involved in the chlorophyll

- degradation pathway of apple fruit during storage. *Food Chem.* 308: 125707. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125707
136. Wang Y., Lu Q., Li B., Si Y., Wang Y., Sun J., Yuan H., Wang A. 2023. LED white light-activated transcription factor MdHY5 inhibits ethylene biosynthesis during apple fruit ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 202: 112372. doi: 10.1016/j.postharvbio.2023.112372
 137. Wang Y., Sugar D. 2015. 1-MCP efficacy in extending storage life of 'Bartlett' pears is affected by harvest maturity, production elevation, and holding temperature during treatment delay. *Postharvest Biol. Technol.* 103: 1–8. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.02.013
 138. Wani N.A., Mishra U. 2022. An integrated circular economic supply chain with controllable carbon emission and deterioration from an apple orchard. *J. Clean. Prod.*: 133962. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133962
 139. WAPA. 2021. World Apple and Pear Association annual report. Available online: <https://www.wapa-association.org/>
 140. Watkins C.B. 2006. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotechnol. Adv.* 24(4): 389–409. doi: 10.1016/j.biotechadv.2006.01.005
 141. Watkins C.B., Nock J.F. 2005. Effects of delays between harvest and 1-methylcyclopropene treatment, and temperature during treatment, on ripening of air-stored and controlled-atmosphere-stored apples. *HortScience* 40(7): 2096–2101. doi: 10.21273/hortsci.40.7.2096
 142. Watkins C.B., Nock J.F. 2012. Rapid 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment and delayed controlled atmosphere storage of apples. *Postharvest Biol. Technol.* 69: 24–31. doi: 10.1016/j.postharvbio.2012.02.010
 143. Watkins C.B., Nock J.F., Whitaker B.D. 2000. Responses of early, mid and late season apple cultivars to postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) under air and controlled atmosphere storage conditions. *Postharvest Biol. Technol.* 19(1): 17–32. doi: 10.1016/S0925-5214(00)00070-3
 144. Wawrzyńczyk A., Józwiak Z.B., Rutkowski K.P. 2008. Fruit quality and ACC oxidase activity in 'Rubinstar' apples treated with 1-MCP. *Acta Hort.* 796: 147–153.
 145. Weber A., Brackmann A., Both V., Pavanello E.P., Anese R.d.O., Thewes F.R. 2015. Respiratory quotient: Innovative method for monitoring 'Royal Gala' apple storage in a dynamic controlled atmosphere. *Sci. Agric.* 72(1): 28–33. doi: 10.1590/0103-9016-2013-0429
 146. Weber A., Thewes F.R., Anese R.d.O., Both V., Pavanello E.P., Brackmann A. 2017. Dynamic controlled atmosphere (DCA): Interaction between DCA methods and 1-methylcyclopropene on 'Fuji Suprema' apple quality. *Food Chem.* 235: 136–144. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.05.047
 147. Wei J., Ma F., Shi S., Qi X., Zhu X., Yuan J. 2010. Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 56(2): 147–154. doi: 10.1016/j.postharvbio.2009.12.003
 148. Weigl T., Børve J., Follett E., Magerøy M.H., Larsen H., Fossdal C.G., Remberg S.F. 2026. Modulating postharvest apple fruit physiology by managing the harvest date and 1-MCP application. *Postharvest Biol. Technol.* 231: 113938. doi: 10.1016/j.postharvbio.2025.113938
 149. Wendt L.M., Ludwig V., Rossato F.P., Berghetti M.R.P., Schultz E.E., Thewes F.R., Soldateli F.J., Brackmann A., Both V. 2022. Combined effects of storage temperature variation and dynamic controlled atmosphere after long-term storage of 'Maxi Gala' apples. *Food Packag. Shelf Life* 31: 100770. doi: 10.1016/j.fpsl.2021.100770
 150. Wills R., Bambridge P., Scott K. 1980. Use of flesh firmness and other objective tests to determine consumer acceptability of Delicious apples. *Aust. J. Exp. Agric.* 20(103): 252. doi: 10.1071/EA9800252
 151. Win N.M., Yoo J., Naing A.H., Kwon J.-G., Kang I.-K. 2021. 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment delays modification of cell wall pectin and fruit softening in 'Hwangok' and 'Picnic' apples during cold storage. *Postharvest Biol. Technol.* 180: 111599. doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111599
 152. Wong R., Kim S., Chung S.J., Cho M.S. 2020. Texture preferences of Chinese, Korean and US consumers: A case study with apple and pear dried fruits. *Foods* 9: 377.
 153. Xu X., Guo W.G., Rodgers M.D. 2020. A real-time decision support framework to mitigate degradation in perishable supply chains. *Comput. Ind. Eng.* 150: 106905. doi: 10.1016/j.cie.2020.106905

154. Yang X., Song J., Campbell-Palmer L., Fillmore S., Zhang Z. 2013. Effect of ethylene and 1-MCP on expression of genes involved in ethylene biosynthesis and perception during ripening of apple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 78: 55–66. doi: 10.1016/j.postharvbio.2012.11.012
155. Yoo J., Jung H., Win N.M., Kwon J.G., Cho Y.J., Jung H.Y., Lee D.H., Kang I.K. 2020a. Changes in fruit quality attributes, cell wall materials, and related hydrolases activities in 1-methylcyclopropene (1-MCP)-treated ‘Honggeum’ apples during cold storage. *Hortic. Sci. Technol.* 38: 870–879.
156. Yoo J., Kang I.-K. 2021. Effect of application time of 1-methylcyclopropene treatment on fruit quality attributes in ‘Fuji’ apples during simulated marketing period. *Korean J. Food Preserv.* 28(3): 318–324. doi: 10.11002/kjfp.2021.28.3.318
157. Yoo J., Kim S.H., Kwon J.G., Cho Y.J., Kang I.K. 2020b. Effects of 1-methylcyclopropene treatments on fruit quality attributes and cell wall metabolism in cold stored ‘Summer Prince’ and ‘Summer King’ apples. *Hortic. Sci. Technol.* 38: 660–674.
158. Zhang J., Ma Y., Dong C., Terry L.A., Watkins C.B., Yu Z., Cheng Z.-M. 2020. Meta-analysis of the effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on climacteric fruit ripening. *Hortic. Res.* 7(1). doi: 10.1038/s41438-020-00405-x
159. Zhang K., Zhang D., Wang X., Xu X., Yu W., Wang C., Yuan Y., Yang S., Cheng C. 2024a. Integrated analysis of postharvest storage characteristics of seven apple cultivars and transcriptome data identifies MdBBX25 as a negative regulator of fruit softening during storage in apples. *Postharvest Biol. Technol.* 207: 112646. doi: 10.1016/j.postharvbio.2023.112646
160. Zhang L., Zhang P., Gao M., Zhao Y., Zhang C., Zhu H. 2022b. Integrative metabolomics and transcriptomics analyses reveal pivotal regulatory mechanisms of 1-methylcyclopropene in maintaining postharvest storage quality of ‘Fuji’ apples. *Food Qual. Saf.* doi: 10.1093/fqsafe/fyac063
161. Zhang S., Li Y., Du M., Li X., Wang J., Ban Z., Jiang Y. 2024b. Practical 1-methylcyclopropene technology for increasing apple (*Malus domestica* Borkh.) storability in the Aksu region. *Foods* 13(18): 2918. doi: 10.3390/foods13182918
162. Zhang Y., Zhu D., Ren X., Shen Y., Cao X., Liu H., Li J. 2022a. Quality changes and shelf-life prediction model of postharvest apples using partial least squares and artificial neural network analysis. *Food Chem.* 394: 133526. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133526

Dorobek doktorantki

Publikacje naukowe stanowiące rozprawę doktorską

- PI. Malachowska M., Tomala K.** Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples during long-term storage. *Agriculture* 2022; 12, 2073. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122073>. **(100 pkt.)**
- PII. Malachowska M., Tomala K.** Determinants of postharvest quality in 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples: The role of harvest date, storage duration, and 1-MCP application. *Agriculture* 2025; 15, 2363. <https://doi.org/10.3390/agriculture15222363>. **(100 pkt.)**
- PIII. Malachowska M., Tomala K.** Apple quality during shelf-life after long-term storage and simulated transport. *Agriculture* 2023; 13(11), 2045. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112045>. **(140 pkt.)**

Pozostałe publikacje naukowe w renomowanych czasopismach naukowych (od najstarszych)

1. Tomala K., **Malachowska M.**, Guzek D., Głąbska D., Gutkowska K. The effects of 1-methylcyclopropene treatment on the fruit quality of 'Idared' apples during storage and transportation. *Agriculture* 2020; 10, 0490. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110490>. **(100 pkt.)**
2. Tomala K., Guzek D., Głąbska D., **Malachowska M.**, Krupa T., Gutkowska K. The influence of 1-methylcyclopropene on the quality parameters of Idared apples after 8 weeks of storage simulating long-distance transportation. *Agronomy* 2021; 11(3), 528. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030528>. **(100 pkt.)**
3. Tomala K., Guzek D., Głąbska D., **Malachowska M.**, Widłak Ł., Krupa T., Gutkowska K. Maintaining the quality of 'Red Jonaprince' apples during storage by 1-methylcyclopropene preharvest and postharvest treatment. *Agriculture* 2022; 12(8):1189. <https://doi.org/10.3390/agriculture1208118>. **(100 pkt.)**
4. Tomala K., Guzek D., Głąbska D., **Malachowska M.**, Widłak Ł., Krupa T., Gutkowska K. Assessment of the quality of 'Red Jonaprince' apples during storage after delayed harvesting and 1-Methylcyclopropene (1-MCP) preharvest and postharvest treatment. *Agronomy* 2023; 13(7):1730. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071730>. **(100 pkt.)**
5. **Malachowska M.**, Majak T., Krupa T., Tomala K. Increasing Productivity and Fruit Quality of 'Mutsu' Apple Orchard by Dwarfing Treatments. *Agriculture* 2024; 14, 1838. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101838>. **(100 pkt.)**

Rozdziały w monografiach naukowych

1. **Malachowska M.**, Tomala K. 2021. Wpływ preparatów Harvista™ i SmartFresh™ ProTabs na stan fizjologiczny oraz jakość jabłek odmiany Red Cap® przechowywanych w warunkach ULO. W: Krupa T., Okła-Wierzbicka A., Czerwiński H. (red.) XXV Dzień Otwarty Sadu Doświadczalnego SGGW w Wilanowie. PWR: 81-90 (ISBN 978-83-7940-021-8). **(5 pkt.)**

2. **Małachowska M.**, Małachowski A., Tomala K. 2022. Wpływ 1-MCP oraz długości przechowywania na jakość jabłek odmiany Red Cap® eksportowanych na dalekie rynki. W: Jędrzejewska J., Kalbarczyk K. (red.) Żywność i żywienie w ochronie zdrowia i środowiska. Wydawnictwo Naukowe TYGIEL Sp. z o. o., Lublin: 220–238 (ISBN 978-83-67104-49-4). (20 pkt.)

Dane bibliometryczne (Web of Science, stan na 24.02.2026 r.)

H-index (WoS): 6

Sumaryczny Impact Factor (IF) publikacji do doktoratu: 10,5

Sumaryczny IF: 27,874

Punkty ministerialne (publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej): 340 pkt

Punkty ministerialne (pozostałych publikacji): 525 pkt

Łączna liczba punktów ministerialnych: 865 pkt

Doniesienia na konferencjach naukowych

2021

1. referat (EN, online) – **Małachowska M.** 2021. Effects of Harvista™ and SmartFresh™ ProTabs on physiological state and quality of apples of Red Cap® cultivar stored in ULO conditions. ELLS Student Conference, Warsaw (online), 19-20.11.2021 r.

2022

1. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Małachowski A., Tomala K. 2022. Wpływ 1-MCP oraz długości przechowywania na jakość jabłek odmiany Red Cap® eksportowanych na dalekie rynki. Konf. „Interdyscyplinarność kluczem do rozwoju”, Lublin, 24-27.03.2022 r.
2. referat (PL, online) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2022. Wpływ przed- i pozbiorczego zastosowania 1-MCP na jakość jabłek odmiany 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' podczas długotrwałego przechowywania. V Konferencja w naukach o życiu, Warszawa (online), 14.12.2022 r.

2023

1. poster (EN, online) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2023. Effects of Harvista™ and SmartFresh™ ProTabs on physiological state and quality of 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples for long-distance transportation. Food Symposium 3.0 – LSU AgCenter/Mendelu/SGGW, Baton Rouge, Louisiana, 20-24.03.2023 r.
2. referat (EN, online) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2023. Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples during long-term storage under DCA conditions. XV. year of Interactive Conference of Young Scientists (PREVEDA), Słowacja (online), 22.05.2023 r.

3. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2023. Wpływ przed- i pozbiorniczego stosowania 1-MCP na jakość jabłek odmiany 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' podczas długotrwałego przechowywania w warunkach DKA. VI Zjazd PTNO „Przyjazne środowisku ogrodnictwo w życiu współczesnego człowieka”, Olsztyn, 21-22.06.2023 r.
4. referat (PL, stacjonarnie) – Tomala K., **Małachowska M.** 2023. Wpływ preparatów Harvista™ i SmartFresh™ ProTabs na jakość przechowywanych jabłek. VI Zjazd PTNO „Przyjazne środowisku ogrodnictwo w życiu współczesnego człowieka”, Olsztyn, 21-22.06.2023 r.
5. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2023. Innowacyjne przechowywanie jabłek gwarancją spełnienia oczekiwań konsumentów. III Ogólnopolska Konferencja Studentów i Doktorantów „Żywność, żywienie, rynek. Innowacje w nauce i praktyce”, Warszawa, 28.09.2023 r.

2024

1. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2024. Odkrywając tajemnice długotrwałej świeżości: Jak zastosowanie 1-MCP wpływa na jakość jabłek przechowywanych w warunkach DKA? Ogólnopolska Konferencja Naukowa Krajowej Reprezentacji Doktorantów, Katowice, 22-23.03.2024 r.
2. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2024. Optymalizacja przechowywania jabłek odmiany 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' poprzez zastosowanie 1-MCP i technologii DKA: Skuteczne strategie dla utrzymania wysokiej jakości jabłek. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Innowacyjne ogrodnictwo źródłem produktów wysokiej jakości”, Lublin, 4-6.06.2024 r.
3. referat (PL, stacjonarnie) – Tomala K., **Małachowska M.**, Majak T. 2024. Ocena wzrostu i plonowania jabłoni oraz stanu fizjologicznego owoców odmiany 'Mutsu' zależnie od metody skarłania drzew. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Innowacyjne ogrodnictwo źródłem produktów wysokiej jakości”, Lublin, 4-6.06.2024 r.

2025

1. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Tomala K. 2025. Wpływ preparatów Harvista™ i SmartFresh™ na jakość przechowalniczą jabłek odmiany 'Gala'. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Wyzwania współczesnego ogrodnictwa”, Lublin, 4-6.06.2025 r.
2. referat (PL, stacjonarnie) – **Małachowska M.**, Bednarski P., Tomala K. 2025. Studia nad jakością przechowalniczą gruszek odmiany 'Konferencja'. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Wyzwania współczesnego ogrodnictwa”, Lublin, 4-6.06.2025 r.

Nagrody i wyróżnienia (od najstarszych)

- 15.12.2021 – I miejsce w Konkursie Prac Dyplomowych na Najlepszą Pracę Dyplomową obronioną w 2020 r. – organizator: Koło Naukowe Ogrodników SGGW w Warszawie – praca inżynierska.
- 14.05.2022 – Wyróżnienie w Konkursie na najlepszy poster SGGW – organizator: Szkoła Doktorska SGGW w Warszawie.
- 15.06.2022 – I miejsce w Konkursie Prac Dyplomowych na Najlepszą Pracę Dyplomową obronioną w 2021 r. – organizator: Koło Naukowe Ogrodników SGGW w Warszawie – praca magisterska.
- 22.05.2023 – Wyróżnienie – XV. year of Interactive Conference of Young Scientists (PREVEDA), Słowacja – prezentacja.
- 28.09.2023 – I miejsce – III Ogólnopolska Konferencja Studentów i Doktorantów „Żywność, żywienie, rynek. Innowacje w nauce i praktyce”, Warszawa – prezentacja.
- 14.05.2024 – Wyróżnienie w „Contest for the best reel during the SGGW Doctoral School Week”.
- 02.10.2024 – Dyplom uznania Wydziału Ogrodniczego i Instytutu Nauk Ogrodniczych SGGW w Warszawie za współpracę w realizacji działań edukacyjnych.

Działalność organizacyjna i dodatkowa

Funkcje uczelniane i przedstawicielskie (SGGW)

- 18.10.2023 – 31.12.2024 – Przedstawiciel Rady Doktorantów w Radzie Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
- 01.10.2024 – obecnie (kadencja 2024–2028) – Członek Rektorskiej Komisji ds. Jakości Kształcenia
- 01.10.2024 – obecnie (do 31.08.2028) – Członek Senackiej Komisji ds. Nauki i Rozwoju Kadr
- 01.01.2025 – obecnie – Przedstawiciel Doktorantów w Radzie Instytutu Nauk Ogrodniczych
- od 02.2026 r. – obecnie – członek Zespołu ds. Upowszechniania Informacji o Wydziale

Samorząd doktorantów (Rada Doktorantów SGGW)

- 28.04.2023 – 06.03.2025 – Wiceprzewodnicząca Rady Doktorantów ds. Nauki
- 28.04.2023 – 06.03.2025 – Członek Rady Doktorantów SGGW w Warszawie
- 24.01.2024 – 06.03.2025 – Koordynatorka Zespołu ds. Nauki i Kształcenia (NiK)

Członkostwo w organizacjach naukowych

- 08.06.2022 – obecnie – Członek Polskiego Towarzystwa Nauk Ogrodniczych (PTNO)

Szkolenia i warsztaty

- 04–06.12.2023 – Panel szkoleniowy:
 - ✓ „Samorządność akademicka jako skuteczna droga osiągania celów środowiskowych”
 - ✓ „Budowanie i kierowanie zespołem, a delegowanie obowiązków”
 - ✓ „Zarządzanie konfliktem i komunikacja w zespole”
 - ✓ „Negocjacje w środowisku akademickim”
- 23.01.2024 – „Popularyzacja nie boli”
- 02.02.2024 – Szkolenie: EndNote
- 19 i 21.03.2024 – „Zdobądź Kompetencje Przyszłości z EIT Food!”
- 20–22.06.2024 – Szkolenie z zakresu technik mikroskopowych: „Letnie Warsztaty Mikroskopii Optycznej”
- 28–30.06.2024 – Szkolenie: techniki wysokosprawnej chromatografii ciekłej HPLC/U-HPLC w praktyce
- 18.09.2024 – MOCK Panel (NCN) – warsztaty dla naukowców: ocena wniosków; posiedzenie zespołu ekspertów
- 3.02.2026 – Szkolenie pt. Nauczyciele akademicy SGGW wobec studentów z niepełnosprawnościami

Podnoszenie kwalifikacji zawodowych

Studia podyplomowe

Zarządzanie projektami – Akademia Leona Koźmińskiego (ocena b. dobry – graduacja 10.04.2026 r.)



Certyfikaty

Kurs Tutora I stopnia – w trakcie (planowane zakończenie: 10.05.2026 r.)

**Kopie publikacji składających się na rozprawę doktorską wraz z oświadczeniami
współautorów**

Article

Effect of Preharvest and Postharvest Application of 1-MCP on the Quality of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) Apples during Long-Term Storage

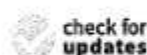
Maria Małachowska * and Kazimierz Tomala 

Department of Pomology and Horticulture Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS), 159C Nowoursynowska Street, 02-787 Warsaw, Poland

* Correspondence: maria_malachowska@sggw.edu.pl; Tel.: +48-22-593-2080

Abstract: Fruit growers are looking for effective solutions to preserve the high quality of apples after storage. Therefore, the aim of this study was to assess the impact of pre- and postharvest use of 1-MCP on the quality of ‘Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)’ apples harvested at the optimal harvest date and at a delayed harvest date and stored for 9 months under conditions similar to DCA (0.6% CO₂ and 0.6% O₂). Four treatments: control (1-MCP untreated), 1-MCP treated 7 days before harvest (Harvista[™]), 1-MCP treated 7 days after harvest (Smart-Fresh[™]), and 1-MCP treated before and after harvest (Harvista[™] + SmartFresh[™]) were used, respectively, for each of the above harvest dates. After 5, 7, and 9 months of storage and after an additional 7-day shelf-life period, the following properties were determined: flesh firmness, soluble solids content, titratable acidity, and ethylene production rate. The harvest date and the 1-MCP application date affected ethylene production rate which was reflected in fruit flesh firmness and acidity ($p < 0.05$). Apples collected at the optimal harvest date from trees sprayed with Harvista[™] before harvest retained high firmness (>55 N) after 7 days of shelf-storage at 20 °C, even if previously stored for 9 months. Apples collected later showed firmness similar to the best preferred by consumers only if treated with 1-MCP after harvest.

Keywords: apples; ethylene; firmness; ‘Gala’; Harvista[™]; SmartFresh[™]; storage; titratable acidity



Citation: Małachowska, M.; Tomala, K. Effect of Preharvest and Postharvest Application of 1-MCP on the Quality of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) Apples during Long-Term Storage. *Agriculture* 2022, 12, 2073. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122073>

Academic Editor: Grzegorz Lysiak

Received: 14 November 2022

Accepted: 2 December 2022

Published: 3 December 2022

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Apple consumers pay a great deal of attention to the attractiveness of blush [1], which is why the ‘Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)’ cultivar, the fruits of which are one colour with a striped blush, deserves special notice. As a small fruit cultivar, it is an ideal snack for children at school. According to the WAPA (the World Apple and Pear Association), Poland, with an apple production of 4.3 million tonnes, was the leader in the European Union and the third largest apple producer in the world in 2021. Such a large production volume makes it necessary to export apples, including to sales markets in remote locations. A big challenge is to keep the high quality of apples to be sold on the market after long-term storage.

The apple is a climacteric fruit species in which ethylene stimulates the ripening process [2], which promotes the formation of the fruit’s typical taste, and at the same time, results in a change in flesh texture. In terms of storage, the effect of ethylene is undesirable, because ethylene leads to the production of still more ethylene in fruit, and thus, accelerates fruit ripening. Ethylene causes a decrease in organic acids and weakens the connections between cells, which leads to the relaxation of the structure of the flesh and deterioration of its texture, thus negatively affecting the postharvest quality of apples [3]. The less firm and juicy is the apple flesh, the more strongly pronounced is the mealy taste which is characteristic of overripe apples and disliked by consumers [4]. The flesh firmness threshold acceptable to consumers is approximately 55 N for apples considered to be hard, such as various mutations of the ‘Gala’ cultivar [5].

There are several ways to limit the production of ethylene and thus, to slow down the ripening of apples. The most effective of them is the postharvest treatment of apples with 1-methylcyclopropene (1-MCP). The use of this compound helps preserve the high quality of apples during long-term storage, and thus, enables their export to distant markets [6,7]. The effectiveness of 1-MCP depends largely on the species or cultivar [8–10], the ripening stage of fruit at harvest [11–13], the number of applications, and the concentration of the active substance [14], as well as the time interval between the harvest and the application [15].

Fruits intended for storage should be harvested at the correct maturity stage [16–19]. With the declining availability of harvest workers, this is becoming increasingly difficult to achieve. A delayed harvest results in worse quality and a significantly shorter shelf life of apples. This can be prevented by using 1-MCP before harvest [20,21]. Through preharvest treatment, 'Fuji' apples retained high firmness and titratable acidity even after 9 months of storage at 0.5 °C [22], 'Honeycrisp' apples were less susceptible to soft scald [23], and 'Gala' apples lost firmness more slowly and suffered less from disorders caused by a delay in harvest [24].

To extend the storage period, modern technologies applying low oxygen atmosphere are used. Fruit of 'Royal Gala' [25–27], 'Fuji Suprema' [28], 'Golden Delicious' [29], and 'Elstar' [30] stored in ULO (Ultra Low Oxygen) or DCA (Dynamic Control Atmosphere) conditions were distinguished by higher firmness than those stored in standard CA. 'Royal Gala' apples after 8 months of storage under DCA conditions had also a higher content of organic acids compared to those stored in CA [26]. In contrast, Thewes et al. [25] did not observe any significant differences in the SSC (soluble solids content) and acidity of 'Royal Gala' apples stored under DCA, ULO, and CA conditions. According to some researchers, apples stored in DCA (0.7–0.8% CO₂ and 0.3–0.4% O₂) are characterised by a better taste than those stored in ULO or CA (3.0% CO₂ and 2.0% O₂) [31,32]. Studies conducted on the 'Pinova' and 'Jonagold' cultivars also showed that consumers preferred apples stored in DCA to those stored in ULO [33]. In turn, 'Granny Smith' apples stored in DCA were perceived as being tastier than apples of the same cultivar treated with 1-MCP [34]. To improve the fruit taste, it is worth considering the use of 1-MCP in combination with low oxygen storage technologies such as ULO and DCA [35].

The effect of the use of 1-MCP before and/or after harvest on the rate of changes in the quality of apples stored under ULO (1.2% CO₂ and 1.2% O₂) conditions is already quite well recognized [20,21,36], while there are few studies showing how 1-MCP affects quality changes in apples stored under DCA conditions. Therefore, the objective of this paper was to focus on the impact of the pre- and post-harvest application of 1-MCP on the quality changes in 'Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)' apples collected at two harvest dates and stored for a long term in an atmosphere containing 0.6% CO₂ and 0.6% O₂ (referred to as DCA in this paper).

2. Materials and Methods

2.1. Research Plan

The experiment was carried out on apples of the 'Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)' cultivar in the storage season 2021/2022. The apples came from trees grafted on the M.9 rootstock planted in 2014 at a spacing of 3.0 × 1.0 m in an experimental orchard of the Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS; Warsaw—52°14' N, 21°1' E). The fruit was harvested at two harvest dates: the optimal harvest date (OHD)—118 days after full bloom (DAFB)—9 September 2021 and a delayed date (DH)—132 DAFB (23 September 2021).

The Streif Index [37] was used to determine the optimal harvest date. Seven days before the harvest date (2 September 2021), one hundred (100) trees were sprayed using the 1-MCP compound (Harvista[™]; AgroFresh Solutions Inc., Philadelphia, PA, USA; 150 g/ha). After 7 days (9 September 2021—OHD), 12 boxes of apples (approximately 15 kg each box) were collected from the unsprayed and sprayed trees, respectively. After another 7 days, during which the fruit was stored in a normal atmosphere (1 °C), half of the samples (6 control boxes and 6 boxes with apples sprayed with Harvista[™]) were treated with 1-

MCP (SmartFresh™ ProTabs, AgroFresh Solutions Inc., Philadelphia, PA, USA; 0.65 µL/L) for 24 h. Next, the apples were placed in 1 m³ containers in which the target atmosphere composition (0.6% CO₂ and 0.6% O₂) was achieved within 24 h. The composition of the atmosphere was obtained by connecting two gas cylinders to the container—one cylinder contained N₂ (98%) to quickly displace oxygen from the volume of the container, the next cylinder contained CO₂ (5%) to increase its concentration in the container.

The same was done with the apples harvested on 23 September 2021 (DH). The fruit from each treatment was stored in a separate 1 m³ container for 5, 7, and 9 months at a temperature of 1 °C and relative humidity of approximately 95%. The following treatments were applied in the experiment:

Control—OHD (fruit harvested at the optimal harvest date, not treated with 1-MCP either before or after harvest);

Harvista™—OHD (fruit harvested at the optimal harvest date from trees sprayed with Harvista™);

SmartFresh™—OHD (fruit harvested at the optimal harvest date from trees not sprayed with Harvista™, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest);

Harvista™ + SmartFresh™—OHD (fruit harvested at the optimal harvest date from trees sprayed with Harvista™, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest);

Control—DH (fruit harvested at the delayed harvest date, not treated with 1-MCP either before or after harvest);

Harvista™—DH (fruit harvested at the delayed harvest date from trees sprayed with Harvista™);

SmartFresh™—DH (fruit harvested at the delayed harvest date from trees not sprayed with Harvista™, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest);

Harvista™ + SmartFresh™—DH (fruit harvested at the delayed harvest date from trees sprayed with Harvista™ and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest).

The quality of the apples was assessed immediately after storage in the above-described conditions and after 7 days of storage at 20 °C. The experiment involved 48 fruit groups (4 treatments with 1-MCP × 2 harvest dates × 3 storage periods × 2 shelf-life periods). In each combination, the quality of apples was assessed in 4 replications, 10 apples per replication.

2.2. Measurements

The optimal harvest date was determined using the Streif Index. For this purpose, fruit flesh firmness and soluble solids content (SSC) was determined and a starch test was performed three times, every 5 days. The Streif Index was calculated according to the following formula:

$$SI = \frac{F}{R * S} \quad (1)$$

where: SI—Streif Index, *F*—firmness (expressed in kG), *R*—soluble solids content (°Bx), *S*—starch test result (scale 1–10). The results from three consecutive measurements (at intervals of 4 days) were used to draw a graph on the basis of which the optimal date of the harvest was determined. The Streif Index for the optimal harvest date of ‘Gala’ apple range from 0.20 to 0.14 [37].

On the day of harvest, *F* and SSC were determined and a starch test was performed once again. In addition, the concentration of ethylene in apple cores was analysed and the colour of the blush was measured. Immediately after 5, 7, and 9 months of storage, respectively, and after 7 days of keeping apples at 20 °C following each storage period, the following measurements were carried out: ethylene production intensity, *F*, titratable acidity (TA), and SSC.

To determine the internal ethylene concentration in apple cores, 1 mL of air was taken from the core using a syringe. The samples were analysed using a gas chromatograph (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA), and the results were given in

$\mu\text{L/L}$. Internal ethylene concentration was determined in 4 replications, 10 apples per replication [36].

The starch test was performed on the cross sections of apples by spraying them with iodine solution in potassium iodide (I_2 in KI), and the obtained coloration of the fruit flesh was compared with the standard table assigning values from 1 to 10. The end result was the average of each replication. The starch test was performed in 4 replications, 10 apples per replication [38].

Flesh firmness was determined from two opposite sides of the fruit (two readings per each apple per replication), after removal of the peel, using a metal probe (measurement speed: 4 mm/s; probe diameter: 11 mm) of a penetrometer (Instron 5542, Instron, Norwood, MA, USA). The results were expressed in Newtons (N) [36].

In the next step, SSC was determined [38]. For this purpose, a piece of flesh with peel was taken from each apple to produce juice in a juicer. SSC in the juice was measured using a refractometer (Atago, Palette PR-32, Atago, Co., Ltd., Tokyo, Japan). The measurements were performed in 4 replications, 10 apples per replication and the results were expressed in Brix degrees ($^{\circ}\text{Bx}$).

TA was determined using the solution of 10 mL apple juice (obtained in a juicer for the purpose of determining SSC) and 100 mL of distilled water in 150 mL flasks. The solution was titrated with 0.1 M NaOH to $\text{pH} = 8.1$. TA was measured by an automatic titrator (TitroLine 5000, Xylem Analytics Germany GmbH, Weilheim, Germany) and the results were expressed as malic acid content in %. The measurements were performed in 4 replications, 10 apples per replication [36].

Blush intensity was evaluated using a Minolta colorimeter (Spectrophotometer CM 508i, Minolta, Co., Ltd., Japan) calibrated with a white plate. Measurements were made on the blush side of 20 apples per replication according to the CIE $L^*a^*b^*$ system, in which L^* is a value in the range of 0–100 (dark–light), parameter a^* is a value in the range between -60 (green) and $+60$ (red) and parameter b^* is a value in the range between -60 (blue) and $+60$ (yellow) [38].

Ethylene production rate was determined by placing apples in air-tight jars of 1500 mL at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. After 1 h, a sample of 1 mL of air was taken from the jar and injected into a gas chromatograph (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA). Measurements were made on 6 individual apples from each treatment, and the results were expressed in $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ [36].

2.3. Statistical Analysis

The Shapiro–Wolf test was carried out to check whether the results showed a normal distribution. In the case of nonparametric distribution, the following tests were used: the Mann–Whitney U test to compare the differences between two independent groups; the Kruskal–Wallis test to compare differences between more than two independent groups. For the normal distribution, the results were analysed by a one-way ANOVA with the Newman–Keuls post hoc test. Differences between average values were reported as significant at $p = 0.05$. Statistical analyses were performed using Statistica 13.3 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA).

3. Results

The results illustrating the physiological stage of apples at the time of harvest are presented in Table 1. According to the recommendations, ‘Gala’ apples intended for long-term storage should have a starch test value of 4–6 [39,40] and a Streif Index value in the range from 0.20 to 0.14 [37]. Based on the analysis of the results, it can be assumed that the apples picked at the first harvest date had the optimal maturity for long-term storage. Apples harvested 2 weeks later were characterized by much more advanced maturity, and those treated with Harvista’s™ had ethylene at a concentration below $0.5\text{ }(\mu\text{L/L})$ in their cores.

Table 1. Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples maturity at optimal harvest date and at delayed harvest date.

Maturity Indices	Optimal Harvest Date		Delayed Harvest	
	Control	Harvista [™]	Control	Harvista [™]
	Mean ± SD			
Internal ethylene content (µL/L)	1.18 ± 0.17	0.48 ± 0.19	1.23 ± 0.64	0.42 ± 0.12
Starch index (-)	3.3 ± 0.3	4.1 ± 1.0 ¹	9.0 ± 0.4	6.8 ± 1.2
Soluble solids content (°Bx)	11.8 ± 0.2	10.8 ± 0.2	13.1 ± 0.3	11.5 ± 0.4
Firmness (N)	85.1 ± 1.8	85.3 ± 1.0	70.6 ± 3.7	75.9 ± 2.2
Titrateable acidity (%)	0.409 ± 0.029	0.375 ± 0.032	0.333 ± 0.018	0.350 ± 0.015
Streif Index (IS) (-)	0.22 ± 0.02	0.20 ± 0.04	0.06 ± 0.01	0.10 ± 0.02
L*	44.3 ± 1.2	43.2 ± 0.2	45.5 ± 1.3	44.8 ± 1.2
a*	23.1 ± 1.1	21.5 ± 1.3	23.8 ± 1.7	25.0 ± 2.0
b*	9.98 ± 1.2	10.5 ± 1.1	11.4 ± 1.7	12.2 ± 1.3

L*, a*, and b*—correct name of fruit color space values¹ no normal distribution (verified using Shapiro-Wilk test: $p \leq 0.05$). [™]—trademark.

3.1. Ethylene Production

The ethylene production rate after 5 months of storage is shown in Figure 1. Spraying trees with Harvista[™] was shown to ensure very low ethylene production, but only in apples picked at OHD, while the ethylene production rate was similarly high in apples from both the control DH and Harvista[™] DH samples. On the other hand, apples treated with SmartFresh[™] were characterized by very low ethylene production, regardless of whether the trees were previously sprayed with Harvista[™] and regardless of the date of harvest.

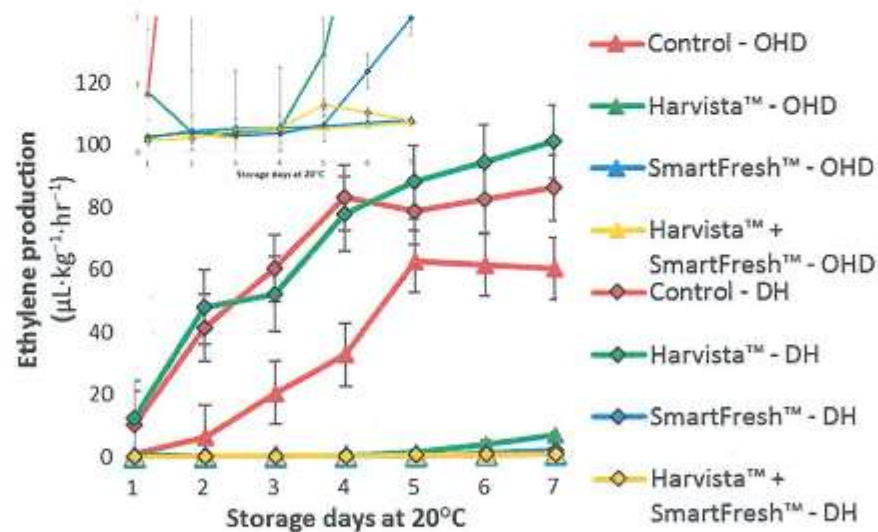


Figure 1. Ethylene production rate by Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples after 5 months of storage at 20 °C; OHD—Optimal harvest date; DH—delayed harvest.

In general, similar relations were also recorded after 7 months of storage (Figure 2). The exception was the Harvista[™] treated apples, which did not differ in terms of ethylene production intensity regardless of the harvest date. Only in the case of apples not treated with 1-MCP (control samples) did those picked at the later date produce significantly more ethylene than those picked at OHD.

After 9 months of storage, Harvista[™] was more effective in counteracting the increase in ethylene production in apples picked at OHD than in those picked later (Figure 3). At the same time, it was found out that apples not treated with 1-MCP (control) and picked at the second harvest date produced more ethylene than control apples harvested

at OHD. Interestingly, fruit treated with 1-MCP (SmartFresh™—OHD; SmartFresh™—DH; Harvista™ + SmartFresh™—OHD; Harvista™ + SmartFresh™—DH) after harvest produced very little ethylene, regardless of the harvest date and Harvista™ application.

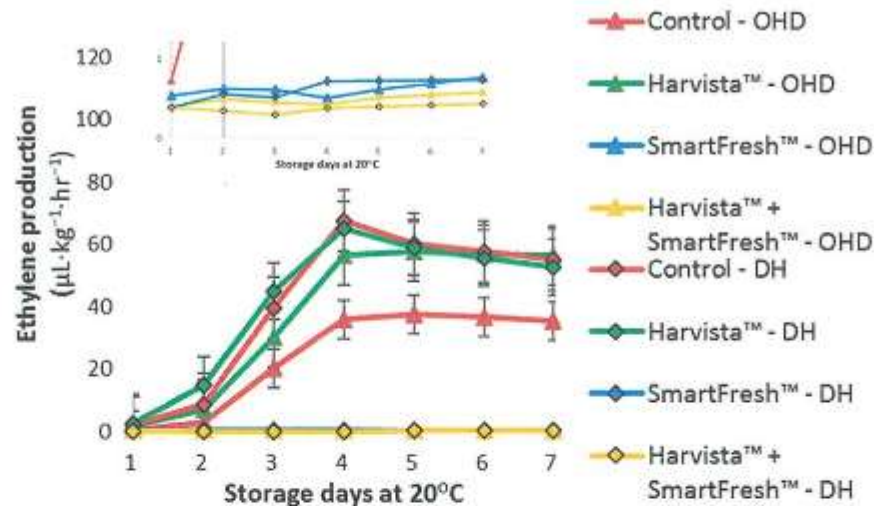


Figure 2. Ethylene production rate by Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples after 7 months of storage at 20 °C; OHD—Optimal harvest date; DH—delayed harvest.

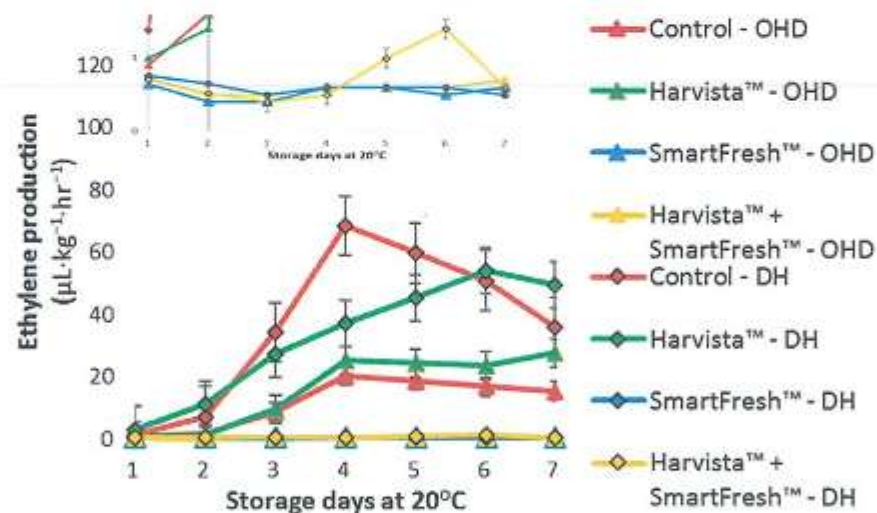


Figure 3. Ethylene production rate by Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples after 9 months of storage at 20 °C; OHD—Optimal harvest date; DH—delayed harvest.

3.2. Flesh Firmness

Flesh firmness immediately after storage is illustrated by the data presented in Table 2. At each date of the study, apples harvested at OHD were characterized by greater firmness than those harvested later. Just as with the significant reduction of ethylene production, the use of 1-MCP effectively helped maintain high firmness, notwithstanding the date of harvest and the length of storage ($p < 0.05$). An exception was observed only in the fruit from the delayed harvest: the firmness of the Harvista™-treated apples was similar to the firmness of the control apples after 5 and 9 months of storage. At the same time, the post-harvest treatment with SmartFresh™ always resulted in apples having firmer flesh than the control ones, regardless of the date of harvest and the length of storage.

Table 2. Flesh firmness (N) of ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples directly after storage as affected by 1-MCP treatment with respect to harvest date in separate storage length.

Harvest Date	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™	p-Value **
After 5 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	63.7 ± 2.5 ^a	78.4 ± 5.9 ^b	78.7 ± 1.4 ^b	85.1 ± 1.5 ^c	<0.0001
Harvest II (DH)	53.2 ± 2.2 ^a	53.7 ± 0.3 ^a	63.0 ± 4.0 ^b	68.8 ± 6.2 ^b	0.0002
p-value ***	0.0210	<0.0001	0.0048	0.0458	
After 7 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	58.5 ± 1.1 ^a	69.9 ± 1.0 ^b	74.4 ± 4.7 ^{bc}	78.6 ± 5.6 ^c	0.0010
Harvest II (DH)	50.8 ± 4.5 ^a	59.1 ± 0.8 ^b	63.5 ± 4.5 ^b	65.1 ± 5.1 ^b	0.0008
p-value **	0.1437	0.0002	0.1491	0.1470	
After 9 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	57.1 ± 1.1 ^a	71.8 ± 4.0 ^b	76.4 ± 2.2 ^c	79.6 ± 0.9 ^c	<0.0001
Harvest II (DH)	49.9 ± 1.2 ^a	52.7 ± 0.5 ^a	65.7 ± 3.1 ^b	67.7 ± 6.1 ^b	<0.0001
p-value **	0.0045	0.0028	0.0052	0.0091	

** Kruskal–Wallis one-way ANOVA of ranks accompanied by the post hoc test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro–Wilk test— $p \leq 0.05$); *** Newman–Keuls test; small letters in a line are used to compare the effect of 1-MCP application; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ™—trademark.

The firmness of the fruit after the 7-day shelf-life period is presented in Table 3. In most samples, the firmness value depended significantly on the date of harvest ($p < 0.05$). Among the apples harvested at OHD, only the control sample after 7 and 9 months of storage had a firmness value below the optimal consumption maturity (<55 N). Interestingly, apples harvested at OHD from Harvista™-sprayed trees maintained firmness above 55 N even after 9 months of storage. On the other hand, among the fruit harvested at the delayed harvest date, only the fruit treated with SmartFresh™ after harvest had firmness above 55 N after the shelf-life period, regardless of the treatment with Harvista™ and the length of the storage. In the case of the apples picked after OHD, spraying trees with Harvista™ proved to be insufficiently effective when it comes to ensuring appropriate firmness after up to 5 months of storage. By contrast, the high firmness values achieved for apples treated with SmartFresh™ both alone and in combination with Harvista™ suggest that these treatment options extend the shelf-life period by a few days.

3.3. Titratable Acidity (TA)

Table 4 presents TA values immediately after storage, taking into account the influence of 1-MCP application and the harvest date in the individual storage period. The effect of 1-MCP treatment on TA was usually significant ($p < 0.05$), with the exception of the fruit harvested at OHD and stored for 7 months ($p = 0.2055$). It should be noted, however, that the TA of the Harvista™-treated apples was generally similar to that of the control apples. On the other hand, the Harvista™ + SmartFresh™-treated apples showed higher TA values than the control apples. This relationship was statistically insignificant only after 7 months of storage of the apples picked at OHD. In turn, no clear influence of the harvest date on the TA of apples could be shown—it was significant ($p < 0.05$) only in 5 out of 12 cases.

The experiment also revealed a significant effect of 1-MCP treatment on the TA of apples after 7-day shelf-life period ($p < 0.05$), with the TA value showing some variability depending on the harvest date and storage length (Table 5). Nevertheless, regardless of the harvest date and the length of storage, Harvista™ + SmartFresh™-treated apples were always more acidic than the control apples. After 5 and 9 months of storage, the apples treated with SmartFresh™ alone were also more acidic than the control apples, regardless of the harvest date. However, the harvest date had a significant impact on the TA value after the shelf-life period of mainly the Harvista™-treated fruit. In this case, the TA of the

apples harvested at OHD was greater than that of the apples harvested later, but this was only true for the apples stored for 5 and 7 months, while the opposite relationship was noted after 9 months of storage.

Table 3. Flesh firmness (N) of ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s)’ apples directly after 7 days of shelf-life storage as affected by 1-MCP treatment with respect to harvest date in separate storage length.

Harvest Date	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™	p-Value **
After 5 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	55.8 ± 1.7 ^a	76.0 ± 6.0 ^b	78.8 ± 1.0 ^b	79.3 ± 2.6 ^c	0.0340
Harvest II (DH)	46.5 ± 3.1 ^a	46.8 ± 3.1 ^a	62.6 ± 5.2 ^b	66.7 ± 4.6 ^b	0.0079
p-value ***	0.0304	0.0304	0.0304	0.0304	
After 7 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	52.5 ± 2.3 ^a	70.3 ± 5.2 ^b	75.9 ± 2.4 ^b	81.3 ± 3.2 ^c	0.0051
Harvest II (DH)	46.4 ± 4.8 ^a	50.1 ± 2.5 ^b	67.6 ± 4.0 ^d	60.7 ± 7.7 ^c	0.0103
p-value ***	0.1124	0.0304	0.0304	0.0304	
After 9 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	52.3 ± 1.4 ^a	68.6 ± 7.4 ^b	73.8 ± 3.2 ^b	78.5 ± 3.0 ^c	0.0084
Harvest II (DH)	44.5 ± 0.4 ^a	48.0 ± 2.5 ^a	64.0 ± 2.3 ^b	66.5 ± 5.4 ^b	0.0053
p-value ***	0.0304	0.0304	0.0294	0.0304	

** Kruskal–Wallis one-way ANOVA of ranks accompanied by the post hoc test; *** Mann–Whitney U test; small letters in a line are used to compare the effect of 1-MCP application; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ™—trademark.

Table 4. Titratable acidity (TA) [%] of ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s)’ apples directly after storage as affected by 1-MCP treatment with respect to harvest date in separate storage length.

Harvest Date	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™	p-Value ***
After 5 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	0.320 ± 0.008 ^a	0.334 ± 0.012 ^a	0.354 ± 0.011 ^b	0.358 ± 0.016 ^b	0.0025
Harvest II (DH)	0.308 ± 0.015 ^a	0.299 ± 0.038 ^a	0.307 ± 0.020 ^a	0.368 ± 0.011 ^b	0.0046
p-value **	0.2046	0.1378	0.0059	0.3480	
After 7 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	0.305 ± 0.010 ^a	0.331 ± 0.027 ^a	0.322 ± 0.022 ^a	0.334 ± 0.018 ^a	0.2055
Harvest II (DH)	0.280 ± 0.017 ^a	0.272 ± 0.011 ^a	0.317 ± 0.017 ^b	0.340 ± 0.025 ^b	0.0006
p-value **	0.0493	0.0061	0.7215	0.7255	
After 9 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	0.211 ± 0.013 ^a	0.250 ± 0.017 ^b	0.284 ± 0.011 ^c	0.245 ± 0.017 ^b	0.0002
Harvest II (DH)	0.239 ± 0.003 ^a	0.263 ± 0.034 ^{ab}	0.268 ± 0.012 ^{ab}	0.297 ± 0.022 ^b	0.0178
p-value **	0.0057	0.5402	0.1134	0.0085	

** Mann–Whitney U test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro–Wilk test— $p \leq 0.05$); *** Newman–Keuls test; small letters in a line are used to compare the effect of 1-MCP application; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ™—trademark.

3.4. Soluble Solids Content (SSC)

The SSC of apples immediately after storage is shown in Table 6. It should be emphasized that in 9 out of 12 cases, there was no significant impact of the harvest date on the SSC value ($p > 0.05$), regardless of 1-MCP application and storage length. However, in the other three cases, the delay in the harvest date resulted in an SSC reduction either after 5 months (SmartFresh™-treated apples) or after 9 months of storage (Harvista™ and Harvista™ +

SmartFresh™-treated apples). 1-MCP treatment had a significant impact on the SSC of the fruit harvested at OHD and stored for 5 months, and on the SSC of the fruit harvested later and stored for 7 and 9 months. For these latter apple samples, treatment with SmartFresh™ alone as well as in combination with Harvista™ resulted in a higher soluble solids content than that observed after treatment only with Harvista™.

Table 5. Titratable acidity (TA) [%] of ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s)’ apples after 7-day shelf-life period as affected by 1-MCP treatment with respect to harvest date in separate storage length.

Harvest Date	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™	p-Value **
After 5 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	0.269 ± 0.022 ^a	0.320 ± 0.010 ^b	0.315 ± 0.019 ^b	0.329 ± 0.019 ^b	0.0388
Harvest II (DH)	0.262 ± 0.006 ^b	0.247 ± 0.009 ^a	0.288 ± 0.003 ^c	0.344 ± 0.009 ^d	0.0029
p-value ***	0.4705	0.0294	0.1080	0.2454	
After 7 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	0.275 ± 0.019 ^a	0.303 ± 0.021 ^b	0.274 ± 0.016 ^a	0.333 ± 0.037 ^b	0.0489
Harvest II (DH)	0.251 ± 0.017 ^a	0.249 ± 0.011 ^a	0.259 ± 0.020 ^a	0.322 ± 0.016 ^b	0.0358
p-value ***	0.1939	0.0294	0.3094	0.6631	
After 9 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	0.206 ± 0.012 ^a	0.226 ± 0.008 ^b	0.267 ± 0.024 ^c	0.236 ± 0.018 ^b	0.0135
Harvest II (DH)	0.193 ± 0.019 ^a	0.264 ± 0.019 ^b	0.262 ± 0.011 ^b	0.283 ± 0.013 ^b	0.0124
p-value ***	0.3123	0.0304	1.0000	0.0304	

** Kruskal–Wallis one-way ANOVA of ranks accompanied by the post hoc test; *** Mann–Whitney U test; small letters in a line are used to compare the effect of 1-MCP application; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ™—trademark.

Table 6. Soluble solids content (SSC) (°Bx) of ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s)’ apples directly after storage as affected by 1-MCP treatment with respect to harvest date in separate storage length.

Harvest Date	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™	p-Value ***
After 5 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	12.7 ± 0.2 ^a	12.2 ± 0.6 ^a	13.6 ± 0.2 ^b	12.3 ± 0.7 ^a	0.0048
Harvest II (DH)	12.3 ± 0.7 ^a	12.5 ± 0.2 ^a	12.9 ± 0.4 ^a	12.3 ± 0.7 ^a	0.3588
p-value ***	0.3202	0.2731	0.0213	0.9610	
After 7 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	13.4 ± 0.7 ^a	12.5 ± 0.2 ^a	12.9 ± 0.5 ^a	13.3 ± 0.5 ^a	0.0962
Harvest II (DH)	12.6 ± 0.4 ^{ab}	11.9 ± 0.7 ^a	13.2 ± 0.4 ^b	13.5 ± 0.8 ^b	0.0126
p-value ***	0.0934	0.1345	0.4755	0.7290	
After 9 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	13.1 ± 0.3 ^a	12.7 ± 0.3 ^a	13.2 ± 0.9 ^a	13.4 ± 0.6 ^a	0.5078
Harvest II (DH)	13.0 ± 0.2 ^b	11.1 ± 0.7 ^a	13.9 ± 0.7 ^c	12.4 ± 0.4 ^b	<0.0001
p-value ***	0.5127	0.0046	0.2148	0.0434	

*** Newman–Keuls post hoc test; small letters in a line are used to compare the effect of 1-MCP application; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ™—trademark.

After additional storage of apples for 7 days at a temperature of 20 °C, relationships similar to those noted immediately after storage (Table 7) were observed. The harvest date affected significantly the SSC of apples ($p < 0.05$) only in four cases. Fruit harvested at OHD had a higher SSC than the fruit from the delayed harvest. At the same time, as was the case

immediately after storage, the 1-MCP application had a significant impact only on the SSC of the apples harvested after OHD and after 7 and 9 months of storage. Usually, the highest SSC was observed in apples treated with SmartFresh™ (both alone and in combination with Harvista™). Significantly lower soluble solids content was observed in the control apples, and the lowest, in the Harvista™-treated apples.

Table 7. Soluble solids content (TSS) (°Bx) of ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples after 7-day shelf-life period as affected by 1-MCP treatment with respect to harvest date in separate storage length.

Harvest Date	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™	p-Value **
After 5 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	13.1 ± 0.9 ^a	12.3 ± 0.4 ^a	13.2 ± 0.2 ^a	13.0 ± 0.4 ^a	0.1538
Harvest II (DH)	12.6 ± 0.7 ^a	12.0 ± 0.3 ^a	12.9 ± 0.3 ^a	12.4 ± 0.4 ^a	0.1000
p-value ***	0.3094	0.2425	0.1489	0.0384	
After 7 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	13.5 ± 0.4 ^a	12.2 ± 0.4 ^a	13.1 ± 0.5 ^a	13.1 ± 0.8 ^a	0.0867
Harvest II (DH)	12.4 ± 0.2 ^b	11.8 ± 0.7 ^a	13.1 ± 0.4 ^c	13.1 ± 0.8 ^c	0.0238
p-value ***	0.0209	0.3836	0.6631	0.8845	
After 9 Months of Storage					
Harvest I (OHD)	13.2 ± 0.4 ^a	13.1 ± 0.4 ^a	13.4 ± 0.6 ^a	13.5 ± 0.5 ^a	0.6658
Harvest II (DH)	12.4 ± 0.3 ^b	11.3 ± 0.4 ^a	14.1 ± 0.3 ^c	12.3 ± 0.3 ^b	0.0047
p-value ***	0.0202	0.0202	0.0575	0.0209	

** Kruskal–Wallis one-way ANOVA of ranks accompanied by the post hoc test; *** Mann–Whitney U test; small letters in a line are used to compare the effect of 1-MCP application; OHD—Optimal harvest date; DH—delayed harvest; ™—trademark.

4. Discussion

This paper assessed the impact of pre- and post-harvest use of 1-MCP on the quality of ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples picked at two harvest dates and stored for 9 months under conditions similar to a dynamically controlled atmosphere (DCA). The study showed a significant impact of 1-MCP application and harvest date on such quality features of apples as: ethylene production rate, flesh firmness, SSC, and TA after 5, 7, and, 9 months of storage. Apple is a climacteric fruit species, so its ripening process is controlled by ethylene. After harvesting, apples undergo aging processes that lead to a deterioration of their quality [41]. In order to slow down this process, measures are taken to reduce ethylene production. They include, among other things, using 1-MCP and storing apples in low-oxygen atmospheres. However, some studies mention the negative impact of both of these methods on the production of aromatic compounds in fruit, which may negatively affect the assessment of its quality by consumers [42,43].

In this paper, it was shown that apples treated with 1-MCP before and/or after harvest had firmer flesh after storage than 1-MCP non-treated apples. This is important because firmness is one of the most important properties affecting the consumers’ perception of fruit quality [1]. When choosing a firm cultivar, consumers expect apples with flesh firmness above 55 N [5,44], which is characteristic of, e.g., ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples. The study has shown that the use of Harvista™ in the orchard before harvest enabled maintaining the firmness of apples at a level acceptable to the consumer (>55 N) after the shelf-life period following even 9 months of storage, provided that the fruit was harvested at OHD. However, if picked at the delayed harvest date (DH) from trees sprayed with Harvista™, the apples were much less firm than expected already after 5 months of storage. Apples picked at the delayed harvest date had to be treated with 1-MCP (either alone or in combination with Harvista™) after harvest to ensure the flesh firmness above 55 N also after 9 months of storage and an additional 7-day shelf-life period at 20 °C. Based

on the data provided in Table 3, it can be assumed that the effectiveness of the 1-MCP application is closely related to the date of harvest. This can be suppressed by the fact that fruits remaining attached to the tree may be capable of creating new ethylene receptors uninhibited by previous 1-MCP treatments, that would restore ethylene response. Such a thesis seems to be likely, especially since the effect of field-applied 1-MCP to reduce the rate of fruit softening during storage is more effective when applied closer to the harvest date [45,46]. McCartney et al. [47] suggest that ethylene receptor formation in ripening fruit is influenced by the cultivar. Therefore, preharvest spraying with 1-MCP may be less useful as a harvest management tool for varieties that rapidly form new ethylene receptors as the fruit ripens. The data from another paper [36] show that the use of 1-MCP in an orchard of the apple cultivar 'Red Jonaprince' was sufficient to maintain fruit firmness at a level acceptable to the consumer, even after 6 months of storage under ULO conditions if the apples were harvested at the optimal time. These data also prove that the effectiveness of both the pre- and post-harvest use of 1-MCP is largely related to the cultivar, and probably also to the atmospheric conditions prevailing in a given location, which is emphasized by many researchers [21,36,48].

Increased ethylene production contributes to a faster decline in apple firmness [27], while 1-MCP by limiting ethylene biosynthesis slows down this process [7,49]. This was confirmed in this paper because apples treated with 1-MCP after harvest were characterized by low ethylene production and high firmness for 7 days at 20 °C, even after 9 months of storage under DCA conditions. These data also confirm other finding according to which ethylene plays an important role in the ripening and aging process of apples [50]. The activity of 1-MCP allows its use both in the orchard [20,21] and after harvest [38]. The composition of the atmosphere in which fruit is stored can be an important factor in enhancing the effect of 1-MCP, since Bekele et al. [51] reported low ethylene production by 'Jonagold' apples treated with 1-MCP, which were stored under CA conditions. Other studies emphasize the high effectiveness of 1-MCP in preventing the increase in ethylene production in apples both stored under DCA conditions [52] and when placed at room temperature [53]. A similar relationship was noted in this paper, especially in the case of apples treated with 1-MCP 7 days after harvest, regardless of the harvest date.

Despite 1-MCP's effective inhibition of the rate of ethylene production, the stored fruit continues to ripen. This is evidenced by changes such as the decrease in TA and the increase in SSC during storage [54–56]. In this paper, a similar pattern occurred in the case of TA. The presented study also found out that the apples treated with 1-MCP had higher TA than the fruit from the control sample, which was particularly noticeable after a total of 9 months of storage and 7 days of shelf life. The possible explanation is that apples treated with 1-MCP produced less ethylene, and therefore matured more slowly and breathed less intensively, which led to a slower consumption of organic acids as a substrate in the respiration process. According to Steffens et al. [57], the higher TA content can be explained by a lower respiration rate and ethylene production, which physiologically characterize the lower metabolic activity of apples treated with 1-MCP. The influence of 1-MCP can be attributed to the lower respiratory activity of 1-MCP-treated fruit. Some studies indicate that the post-harvest treatment of apples with 1-MCP had a negligible effect on SSC [23,58]. This study has shown that the SSC level in apples is only slightly dependent on 1-MCP application before harvest.

Just like higher firmness, higher TA and SSC values noted after using 1-MCP can contribute to better acceptance of fruit by consumers. It should be stressed that consumers often perceive higher content of TA and SSC as increased content of nutrients [59].

Although the study provides information that can facilitate the effective storage of 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples while maintaining sufficient firmness after storage, it is worth pointing out the possibilities of expanding the research in this area. First of all, it would be worth identifying the quality changes in apples first stored for different periods and then exported to distant markets, e.g., by sea, which can take from 6 to 8 weeks. Secondly, the analyses could be extended to include the respiration rate of apple which,

together with the rate of ethylene production, is a decisive factor in the rate of loss of firmness of the stored fruit.

5. Conclusions

To sum up, the SmartFresh™ post-harvest treatment of apples of the ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ cultivar, including apples harvested 2 weeks after the optimal harvest date, helps to maintain ethylene production at a very low level, even after 9 months of storage under DCA conditions. Interestingly, a very slow rate of firmness loss during this time is ensured by spraying trees with Harvista™ before harvest, provided that apples are harvested at the optimal time. Sufficient firmness is more difficult to maintain after storage if there is a delay in the harvest date. In such a case, appropriate firmness of long-stored apples can only be ensured by the post-harvest use of 1-MCP.

Author Contributions: Conceptualization, M.M. and K.T.; methodology, M.M.; software M.M.; validation, M.M.; formal analysis, M.M. and K.T.; investigation, M.M. and K.T.; resources, M.M. and K.T.; data curation, M.M. and K.T.; writing—original draft preparation, M.M. and K.T.; writing—review and editing, M.M. and K.T.; visualization, M.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Polish Ministry of Science and Higher Education within the funds of Institute of Horticulture Sciences, Warsaw University of Life Sciences (WULS), for scientific research. The experiment was financed by AgroFresh Polska Sp. z o. o., who provided Harvista™ and SmartFresh™ ProTabs preparations for preharvest and postharvest use, respectively.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Wong, R.; Kim, S.; Chung, S.J.; Cho, M.S. Texture preferences of Chinese, Korean and US consumers: A case study with apple and pear dried fruits. *Foods* **2020**, *9*, 377. [CrossRef] [PubMed]
2. Thongkum, M.; McAtee, P.M.; Schaffer, R.J.; Allan, A.C.; Ketsa, S. Characterization and Differential Expression of Ethylene Receptor Genes during Fruit Development and Dehiscence of Durian (*Durio Zibethinus*). *Sci. Hortic.* **2018**, *240*, 623–630. [CrossRef]
3. Wei, J.; Ma, F.; Shi, S.; Qi, X.; Zhu, X.; Yuan, J. Changes and Postharvest Regulation of Activity and Gene Expression of Enzymes Related to Cell Wall Degradation in Ripening Apple Fruit. *Postharvest Biol. Technol.* **2010**, *56*, 147–154. [CrossRef]
4. Shukla, M.; Jharkharia, S. Agri-fresh Produce Supply Chain Management: A State-of-the-art Literature Review. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* **2013**, *33*, 114–158. [CrossRef]
5. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbuehl, B.; Casutt, M. Consumer Demands on Eating Quality of Apples: Minimum Requirements on Firmness, Soluble Solids and Acidity. *Acta Hortic.* **2003**, *600*, 693–696. [CrossRef]
6. Mattheis, J.P. How 1-Methylcyclopropene Has Altered the Washington State Apple Industry. *HortScience* **2008**, *43*, 99–101. [CrossRef]
7. Watkins, C.B. The Use of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on Fruits and Vegetables. *Biotechnol. Adv.* **2006**, *24*, 389–409. [CrossRef]
8. Watkins, C.B.; Nock, J.F.; Whitaker, B.D. Responses of Early, Mid and Late Season Apple Cultivars to Postharvest Application of 1-Methylcyclopropene (1-McP) Under Air and Controlled Atmosphere Storage Conditions. *Postharvest Biol. Technol.* **2000**, *19*, 17–32. [CrossRef]
9. Bai, J.; Baldwin, E.A.; Goodner, K.L.; Mattheis, J.P.; Brecht, J.K. Response of Four Apple Cultivars to 1-Methylcyclopropene Treatment and Controlled Atmosphere Storage. *HortScience* **2005**, *40*, 1534–1538. [CrossRef]
10. Lipa, T.; Szot, I.; Dobrzański, B., Jr.; Kaplan, M. The assessment of ten apple cultivars and their susceptibility on bruising after storage and shelf-life of fruit treated with 1-MCP. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2019**, *18*, 129–140. [CrossRef]
11. DeEll, J.R.; Ayres, J.T.; Murr, D.P. 1-Methylcyclopropene Concentration and Timing of Postharvest Application Alters the Ripening of ‘McIntosh’ Apples During Storage. *HortTechnology* **2008**, *18*, 624–630. [CrossRef]
12. Huber, D.J.; Hurr, B.M.; Lee, J.S.; Lee, J.H. 1-Methylcyclopropene Sorption by Tissues and Cell-Free Extracts from Fruits and Vegetables: Evidence for Enzymic 1-MCP Metabolism. *Postharvest Biol. Technol.* **2010**, *56*, 123–130. [CrossRef]
13. Lurie, S. 1-MCP in post-harvest: Physiological Mechanisms of Action and Applications. *Fresh Prod.* **2007**, *1*, 4–15.
14. DeEll, J.R.; Lum, G.B.; Ehsani-Moghaddam, B. Effects of Multiple 1-Methylcyclopropene Treatments on Apple Fruit Quality and Disorders in Controlled Atmosphere Storage. *Postharvest Biol. Technol.* **2016**, *111*, 93–98. [CrossRef]

15. Watkins, C.B.; Nock, J.F. Effects of Delays Between Harvest and 1-Methylcyclopropene Treatment, and Temperature During Treatment, on Ripening of Air-Stored and Controlled-Atmosphere-Stored Apples. *HortScience* **2005**, *40*, 2096–2101. [[CrossRef](#)]
16. Rutkowski, K.; Miszczak, A.; Plocharski, W. The influence of storage conditions and harvest date on quality of 'Elstar' apples. *Acta Hort.* **2003**, *600*, 809–812. [[CrossRef](#)]
17. Błaszczyk, J.; Bieniasz, M.; Nawrocki, J.; Kopeć, M.; Mierzwa-Hersztek, M.; Gondek, K.; Zaleski, T.; Knaga, J.; Bogdań, S. The Effect of Harvest Date and Storage Conditions on the Quality of Remontant Strawberry Cultivars Grown in a Gutter System under Covers. *Agriculture* **2022**, *12*, 1193. [[CrossRef](#)]
18. Lysiak, G. The Sum of Active Temperatures as a Method of Determining the Optimum Harvest Date of 'Šampion' and 'Ligol' Apple Cultivars. *Acta Sci. Pol. Hort. Cultus* **2012**, *11*, 3–13.
19. Markuszewski, B.; Bieniek, A.A.; Wachowska, U.; Bieniek, A.; Krzywińska, I. Effect of biological treatment used before harvesting and storage methods on the quality, health and microbial characteristics of unripe hazelnut in the husk (*Corylus avellana* L.). *PeerJ* **2022**, *10*, e12760. [[CrossRef](#)]
20. Tomala, K.; Grzęda, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. The Effects of Preharvest 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment on the Fruit Quality Parameters of Cold-Stored 'Šampion' Cultivar Apples. *Agriculture* **2020**, *10*, 80. [[CrossRef](#)]
21. Tomala, K.; Grzęda, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. Analysis of Possibility to Apply Preharvest 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment to Delay Harvesting of Red Jonaprinced Apples. *Sustainability* **2020**, *12*, 4575. [[CrossRef](#)]
22. Lee, J.; Kang, I.K.; Nock, J.F.; Watkins, C.B. Effects of Preharvest and Postharvest Applications of 1-Methylcyclopropene on Fruit Quality and Physiological Disorders of 'Fuji' Apples During Storage at Warm and Cold Temperatures. *HortScience* **2019**, *54*, 1375–1383. [[CrossRef](#)]
23. DeEll, J.R.; Ehsani-Moghaddam, B. Preharvest 1-Methylcyclopropene Treatment Reduces Soft Scald in 'Honeycrisp' Apples During Storage. *HortScience* **2010**, *45*, 414–417. [[CrossRef](#)]
24. Argenta, L.C.; Scolaro, A.M.T.; do Amarante, C.V.T.; Vieira, M.J. Preharvest Treatment of 'Gala' Apples With 1-MCP and AVG —II: Effects on Fruit Quality After Storage. *Acta Hort.* **2018**, *1194*, 127–134. [[CrossRef](#)]
25. Thewes, F.R.; Both, V.; Brackmann, A.; Weber, A.; de Oliveira Anese, R. Dynamic Controlled Atmosphere and Ultralow Oxygen Storage on 'Gala' Mutants Quality Maintenance. *Food Chem.* **2015**, *188*, 62–70. [[CrossRef](#)]
26. Weber, A.; Brackmann, A.; Both, V.; Pavanello, E.P.; de Oliveira Anese, R.; Thewes, F.R. Respiratory Quotient: Innovative Method for Monitoring 'Royal Gala' Apple Storage in a Dynamic Controlled Atmosphere. *Sci. Agric.* **2015**, *72*, 28–33. [[CrossRef](#)]
27. Both, V.; Thewes, F.R.; Brackmann, A.; de Oliveira Anese, R.; de Freitas Ferreira, D.; Wagner, R. Effects of Dynamic Controlled Atmosphere by Respiratory Quotient on Some Quality Parameters and Volatile Profile of 'Royal Gala' Apple After Long-Term Storage. *Food Chem.* **2017**, *215*, 483–492. [[CrossRef](#)]
28. Thewes, F.R.; Brackmann, A.; Both, V.; Weber, A.; de Oliveira Anese, R.; Ferrão, T.d.S.; Wagner, R. The Different Impacts of Dynamic Controlled Atmosphere and Controlled Atmosphere Storage in the Quality Attributes of 'Fuji Suprema' Apples. *Postharvest Biol. Technol.* **2017**, *130*, 7–20. [[CrossRef](#)]
29. Gasser, F.; Dätwyler, D.; Schneider, K.; Naunheim, W.; Hoehn, E. Effects of Decreasing Oxygen Levels in the Storage Atmosphere on the Respiration and Production of Volatiles of 'Idared' Apples. *Acta Hort.* **2005**, *682*, 1585–1592. [[CrossRef](#)]
30. Veltman, R.H.; Verschoor, J.A.; van Dugteren, J.H.R. Dynamic Control System (DCS) for Apples (*Malus domestica* Borkh. Cv 'Elstar'): Optimal Quality Through Storage Based on Product Response. *Postharvest Biol. Technol.* **2003**, *27*, 79–86. [[CrossRef](#)]
31. Tran, D.T.; Verlinden, B.E.; Hertog, M.; Nicolai, B.M. Monitoring of Extremely Low Oxygen Control Atmosphere Storage of 'Greenstar' Apples Using Chlorophyll Fluorescence. *Sci. Hort.* **2015**, *184*, 18–22. [[CrossRef](#)]
32. Lafer, G. Storability and Fruit Quality of 'Braeburn' Apples as Affected by Harvest Date, 1-MCP Treatment and Different Storage Conditions. *Acta Hort.* **2008**, *796*, 179–184. [[CrossRef](#)]
33. Kitemann, D.; McCormick, R.; Neuwald, D.A. Effect of High Temperature and 1-MCP Application or Dynamic Controlled Atmosphere on Energy Savings during Apple Storage. *Eur. J. Hort. Sci.* **2015**, *80*, 33–38. [[CrossRef](#)]
34. Zanella, A.; Cazzanelli, P.; Panarese, A.; Coser, M.; Chisté, C.; Zeni, F. Fruit Fluorescence Response to Low Oxygen Stress: Modern Storage Technologies Compared to 1-MCP Treatment of Apple. *Acta Hort.* **2005**, *682*, 1535–1542. [[CrossRef](#)]
35. Radenkova, V.; Juhneva-Radenkova, K. Comparison of Three Storage Techniques for Post-Harvest Quality Preservation of Six Commercially Available Cultivars of Apple. *Int. J. Fruit Sci.* **2018**, *18*, 268–286. [[CrossRef](#)]
36. Tomala, K.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Małachowska, M.; Widlak, L.; Krupa, T.; Gutkowska, K. Maintaining the Quality of 'Red Jonaprinced' Apples During Storage by 1-Methylcyclopropene Preharvest and Postharvest Treatment. *Agriculture* **2022**, *12*, 1189. [[CrossRef](#)]
37. Bühlmann, A.; Rebeaud, S.G. Empfehlungen für die Obstlagerung 2017. *Obstlagerung* **2017**, *17*, 11–14.
38. Tomala, K.; Małachowska, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. The Effects of 1-Methylcyclopropene Treatment on the Fruit Quality of 'Idared' Apples during Storage and Transportation. *Agriculture* **2020**, *10*, 490. [[CrossRef](#)]
39. Lysiak, G. The determination of harvest index of Šampion apples intended for long storage. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2011**, *10*, 273–282.
40. Rutkowski, K. Wyznaczenie terminu zbioru jabłek—teoria a praktyka. In *Przechowywalność Jabłek: Praktyczny Przewodnik*; Rutkowski, A., Paradowski, A., Eds.; Plantpress: Kraków, Poland, 2021; pp. 58–65.
41. Satekge, T.S.; Magwaza, L.S. Postharvest Application of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on Climacteric Fruits: Factors Affecting Efficacy. *Int. J. Fruit Sci.* **2022**, *22*, 595–607. [[CrossRef](#)]

42. Lysiak, G.P.; Rutkowski, K.; Walkowiak-Tomczak, D. Effect of Storage Conditions on Storability and Antioxidant Potential of Pears Cv. 'Conference'. *Agriculture* **2021**, *11*, 545. [[CrossRef](#)]
43. Kondo, S.; Setha, S.; Rudell, D.R.; Buchanan, D.A.; Mattheis, J.P. Aroma Volatile Biosynthesis in Apples Affected by 1-MCP and Methyl Jasmonate. *Postharvest Biol. Technol.* **2005**, *36*, 61–68. [[CrossRef](#)]
44. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbühl, B.; Künsch, U. Efficacy of Instrumental Measurements for Determination of Minimum Requirements of Firmness, Soluble Solids, and Acidity of Several Apple Varieties in Comparison to Consumer Expectations. *Postharvest Biol. Technol.* **2003**, *27*, 27–37. [[CrossRef](#)]
45. McArtney, S.J.; Obemiller, J.D.; Schopp, J.R.; Parkeer, M.L.; Edgington, T.B. Preharvest 1-Methylcyclopropene Delays Fruit Maturity and Reduces Softening and Superficial Scald of Apples During Long-term Storage. *HortScience* **2008**, *43*, 366–371. [[CrossRef](#)]
46. Villalobos-Acuña, M.G.; Biasi, W.V.; Flores, S.; Mitcham, F.J.; Elkins, R.B.; Willits, N.H. Preharvest Application of 1-Methylcyclopropene Influences Fruit Drop and Storage Potential of 'Bartlett' Pears. *HortScience* **2010**, *45*, 610–616. [[CrossRef](#)]
47. McArtney, S.J.; Obermiller, J.D.; Hoyt, T.; Parker, M.L. 'Law Rome' and 'Golden Delicious' Apples Differ in Their Response to Preharvest and Postharvest 1-Methylcyclopropene Treatment Combinations. *HortScience* **2009**, *44*, 1632–1636. [[CrossRef](#)]
48. Baswal, A.K.; Ramezani, A. 1-Methylcyclopropene Potentials in Maintaining the Postharvest Quality of Fruits, Vegetables, and Ornamentals: A Review. *J. Food Process. Preserv.* **2020**, *45*, e15129. [[CrossRef](#)]
49. Watkins, C.B.; Nock, J.F. Rapid 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment and Delayed Controlled Atmosphere Storage of Apples. *Postharvest Biol. Technol.* **2012**, *69*, 24–31. [[CrossRef](#)]
50. Hu, B.; Sun, D.W.; Pu, H.; Wei, Q. Recent Advances in Detecting and Regulating Ethylene Concentrations for Shelf-Life Extension and Maturity Control of Fruit: A Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2019**, *91*, 66–82. [[CrossRef](#)]
51. Bekele, E.A.; Beshir, W.F.; Hertog, M.L.A.T.M.; Nicolai, B.M.; Geeraerd, A.H. Metabolic Profiling Reveals Ethylene Mediated Metabolic Changes and a Coordinated Adaptive Mechanism of 'Jonagold' Apple to Low Oxygen Stress. *Physiol. Plant.* **2015**, *155*, 232–247. [[CrossRef](#)]
52. Weber, A.; Thewes, E.R.; Anese, R.d.O.; Both, V.; Pavanello, E.P.; Brackmann, A. Dynamic Controlled Atmosphere (DCA): Interaction between DCA Methods and 1-Methylcyclopropene on 'Fuji Suprema' Apple Quality. *Food Chem.* **2017**, *235*, 136–144. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
53. Gwanpua, S.G.; Verlinden, B.E.; Hertog, M.L.; Nicolai, B.M.; Geeraerd, A.H. A Mechanistic Modelling Approach to Understand 1-MCP Inhibition of Ethylene Action and Quality Changes during Ripening of Apples. *J. Sci. Food Agric.* **2017**, *97*, 3802–3813. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
54. Thammawong, M.; Arakawa, O. Starch degradation of detached apple fruit in relation to ripening and ethylene. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* **2007**, *76*, 345–350. [[CrossRef](#)]
55. Błaszczyk, J.; Gasparski, K. Influence of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the quality and storability of 'Red Jonaprince' apples stored in different conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2019**, *8*, 7–15. [[CrossRef](#)]
56. Wawrzyńczak, A.; Józwiak, Z.B.; Rutkowski, K.P. Fruit Quality and ACC Oxidase Activity in 'Rubinstar' Apples Treated with 1-MCP. *Acta Hortic.* **2008**, *796*, 147–153. [[CrossRef](#)]
57. Steffens, C.A.; Soardi, K.; Heinzen, A.S.; Amaral Vignali Alves, J.; Silva, J.C.; Talamini do Amarante, C.V.; Brackmann, A. Quality of "Cripps Pink" apples following the application of 1-MCP, ethanol vapor and nitric oxide as pretreatments for controlled atmosphere storage. *J. Food Process. Preserv.* **2021**, *46*, e16121. [[CrossRef](#)]
58. DeEll, J.R.; Lum, G.B. Effects of Low Oxygen Storage and 1-methylcyclopropene on Storage Disorders of 'Empire' Apples. *HortScience* **2017**, *52*, 1265–1270. [[CrossRef](#)]
59. Jha, S.N.; Rai, D.R.; Shrama, R. Physico-chemical quality parameters and overall quality index of apple during storage. *J. Food Sci. Technol.* **2011**, *49*, 594–600. [[CrossRef](#)]

Warszawa, dn. 25.02.2026 r.

Mgr inż. Maria Małachowska

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa

Instytut Nauk Ogrodniczych

maria_malachowska@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo

Szkoły Głównej Gospodarstwa

Wiejskiego w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Małachowska M., Tomala K. **Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples during long-term storage.** Agriculture 2022, 12 (12), 2073

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współtworzeniu koncepcji pracy, opracowaniu metodologii badań, przygotowaniu i wykorzystaniu oprogramowania oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzeniu walidacji, wykonaniu analizy formalnej, realizacji badań, zapewnieniu zasobów niezbędnych do wykonania eksperymentu, opracowaniu i porządkowaniu danych, przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu oraz udziale w jego późniejszej redakcji i korektach. Ponadto przygotowałam wizualizację wyników, co stanowi **75%** pracy.

Podpis


.....

Warszawa, dn. 25.02.2026 r.

Prof. dr hab., dr h.c. Kazimierz Tomala
Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa
Instytut Nauk Ogrodniczych
kazimierz_tomala@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Małachowska M., Tomala K. **Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples during long-term storage.** Agriculture 2022, 12 (12), 2073

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu analizy formalnej, realizacji badań, zapewnieniu zasobów niezbędnych do wykonania eksperymentu, opracowaniu i porządkowaniu danych oraz przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu, a także udziale w jego późniejszej redakcji i korektach, co stanowi **25%** pracy.

Podpis



.....

Article

Determinants of Postharvest Quality in 'Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)' Apples: The Role of Harvest Date, Storage Duration, and 1-MCP Application

Maria Małachowska  and Kazimierz Tomala 

Department of Pomology and Horticulture Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS), ul. Nowoursynowska 159 C, 02-787 Warsaw, Poland

* Correspondence: maria_malachowska@sggw.edu.pl; Tel.: +48-22-593-2080

Abstract

Poland, as a leading apple producer in the EU, must maintain high fruit quality during prolonged storage and distribution, which is crucial for exports to distant markets. Therefore, it is essential to clearly identify which factors most strongly affect quality and the magnitude of their effects in order to make informed choices about pre- and postharvest practices, storage technology, and logistics. The objective of this study was to assess the effect of selected factors on the quality of apples of the 'Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)' cultivar after long-term storage. The study analyzed the effects of harvest date (optimal and delayed), three variants of 1-methylcyclopropene application (control-0 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 1-MCP, Harvista[™], SmartFresh[™], and Harvista[™] + SmartFresh[™]), storage period (5, 7, and 9 months), simulated trading period (0 or 7 days at 20 °C) and storage technology (ULO: 1.2% CO₂: 1.2% O₂; DCA: 0.6% CO₂: 0.6% O₂) in two consecutive seasons (2022/2023 and 2023/2024). Five quality parameters were evaluated: flesh firmness (F), soluble solid content (SSC), titratable acidity (TA), SSC/TA ratio, and the concentration of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC). Backward-elimination stepwise regression and partial eta squared (η^2) calculations were used to analyze the data to determine the factors with the greatest impact. The post-harvest application of 1-MCP had the strongest effect in terms of maintaining firmness ($\eta^2 = 70.4\%$) and acidity ($\eta^2 = 38.0\%$) and reducing ACC content ($\eta^2 = 21.3\%$). Harvista[™] preparation had a weaker or negligible effect on ACC content, but reduced SSC ($\eta^2 = 22.7\%$). Harvest date, storage duration, and shelf life significantly influenced all traits, with controlled-atmosphere regime further modulating outcomes. By integrating preharvest maturity with treatment timing and CA storage, we disentangled the relative contributions of harvest timing, treatment, and storage. The results provide actionable inputs for a decision-support tool to help producers maintain target quality—firmness, SSC, TA, SSC/TA, and ACC—through optimized practice, storage technology choice, and logistics.

Keywords: DCA; harvest maturity; postharvest physiology; shelf life; ULO



Academic Editor: Shixiang Yao

Received: 25 September 2025

Revised: 4 November 2025

Accepted: 12 November 2025

Published: 14 November 2025

Citation: Małachowska, M.; Tomala, K. Determinants of Postharvest Quality in 'Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)' Apples: The Role of Harvest Date, Storage Duration, and 1-MCP Application. *Agriculture* **2025**, *15*, 2363. <https://doi.org/10.3390/agriculture15222363>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Poland is the largest apple producer in the European Union and one of the main exporters of apples worldwide [1,2]. The recent years have seen a gradual increase in crop acreage and apple production with a simultaneous decrease in domestic consumption of this fruit [3]. As a result, the ability to maintain the high quality of apples for a long time is

gaining in importance, which is particularly relevant in the context of exports to distant markets, which require many months of storage and transport in refrigerated conditions. Poland exports apples primarily to EU countries—especially Germany and Romania—and to third-country markets, chiefly Egypt; other notable destinations include Kazakhstan and India [4]. Firmness is one of the key quality attributes that determine the acceptance of fruit by consumers [3]. This parameter, strongly associated with freshness and crunchiness, is the basic criterion for assessing the sensory quality of apples [5,6]. These traits are particularly important when it comes to hard-flesh dessert cultivars, such as ‘Gala’ apples, which are characterized by high visual attractiveness, a sweet taste, and a compact flesh structure, which significantly determine their popularity among consumers [7–9].

At the same time, apples of this cultivar, despite their high initial quality, are susceptible to loss of firmness during storage and trade. A reduction in this parameter below 55 N often results in a negative consumer assessment, as the fruit is perceived as overripe and less fresh, with an undesirable mealy flesh texture [10]. Due to the growing demands of consumers, it is necessary not only to ensure the attractive appearance of apples, such as intense skin color and no mechanical damage, but also to maintain the high internal quality of the fruit. The following parameters are of key relevance in this context: the firmness of the fruit, the right SSC, and a balanced taste resulting from the proportion of sugars and organic acids [11].

Apples of this cultivar, despite their high initial quality, are particularly susceptible to firmness loss during storage and commercial handling. Once firmness declines below ~55 N, consumers frequently judge the fruit as overripe and less fresh, with a mealy texture [10]. Because firmness strongly conditions acceptance at destination, mitigating its decline is central to the research problem addressed here—namely, how pre- and postharvest interventions can slow softening across extended storage and distribution.

In parallel, maintaining internal quality is essential to overall eating experience. Beyond external appearance, key parameters include soluble solids content (SSC) and titratable acidity, whose balance determines perceived sweetness, freshness, and flavor complexity [11]. In this study, we therefore examine how the same interventions that target firmness also influence SSC and acidity, clarifying potential synergies or trade-offs that matter for long-distance export scenarios.

Apples are classified as a climacteric fruit whose ripening is regulated by ethylene, a phytohormone that plays a key role in the growth and aging of tissues [12–15]. After harvest maturity is reached on-tree, ethylene biosynthesis intensifies and tissue sensitivity increases, triggering physiological and biochemical transitions. Off-tree, the fruit maintains elevated ethylene production and high sensitivity, driving ripening during storage and shelf life; the rate can be modulated by CA/ULO conditions and 1-MCP application. The most important ones include the degradation of pectins and hemicelluloses in cell walls, a decrease in acidity, loss of firmness, and the development of an undesirable, mealy flesh texture [16,17]. These phenomena, although natural, are unfavorable for fruit intended for long-term storage and subsequent sale, as they lead to a significant reduction in its commercial and sensory value [18–20].

To slow down ripening and extend the shelf life of apples, 1-methylcyclopropene (1-MCP) is used—a compound that binds strongly to ethylene receptors and blocks them, thereby inhibiting ethylene-driven ripening. In practice, 1-MCP is applied both on-tree (preharvest)—Harvista™—and off-tree (postharvest)—SmartFresh™. The effectiveness of both applications is well documented, and the outcome depends on multiple factors: cultivar, application timing, fruit maturity at harvest, temperature, and the storage technology used [21–29]. Because each approach used alone has limitations (preharvest application does not secure very long storage; postharvest application cannot compensate for fruit

already advanced in ripening on-tree), a combined application provides complementary control of the ethylene response and increases the likelihood of meeting consumer acceptance thresholds at the destination. In recent years, particular importance has been attached to combining 1-MCP with modern solutions, such as ultra-low oxygen atmosphere (ULO) or dynamically controlled atmosphere (DCA), which allow a further extension of the storage period while maintaining the high quality of the fruit [18,19,30–32]. The observed benefits align with the complementary mechanisms of 1-MCP (receptor blockade) and ULO/DCA (metabolic suppression), which together reduce firmness loss and the incidence of physiological disorders during long-term storage. This approach is particularly relevant for ‘Gala’ apples destined for distant export markets, where months-long storage and transport are required.

Modern storage technologies play a key role in reducing the negative physiological changes that occur in fruit during long-term storage. By significantly reducing oxygen concentrations and increasing carbon dioxide concentrations in the storage chamber, these technologies make it possible to slow the intensity of cellular respiration, ethylene biosynthesis, and the associated processes of tissue maturation and aging [18]. Numerous studies have shown the high effectiveness of these methods in maintaining firmness, acidity, appropriate SSC, and overall sensory quality in many apple cultivars, including ‘Royal Gala’, ‘Golden Delicious’, ‘Elstar’, and ‘Reinette Simirenko’ [33–36]. Furthermore, it has been shown that the efficiency of ultra-low oxygen (ULO) and dynamically controlled atmosphere (DCA) can be significantly increased by combining them with post-harvest application of 1-MCP (SmartFresh™). This indicates a potential synergistic effect—an ethylene inhibitor reduces the perception of the hormonal signal, while an atmosphere with low oxygen levels reduces its biosynthesis [18,19,30–32,37–41]. Although 1-MCP blocks ethylene receptors, it also has drawbacks—most notably a reduction in volatile (aroma) emissions, and its effect may wane over longer time horizons; this can be partially mitigated by applying DCA, which slows metabolism and ethylene biosynthesis. This integrated approach, which combines physicochemical and biochemical strategies, is one of the most effective solutions for the long-term storage of apples.

Despite numerous studies on individual factors that affect apple quality, such as storage time and conditions, the use of 1-MCP, or harvest date, these variables are still relatively rarely analyzed in a comprehensive and quantitative way. In particular, there are no studies that would take into account the interactions of individual factors and the relative strength of their impact on the quality of fruit in the context of complex trade processes, including long transport and storage under conditions of simulated trade. To address this gap, we jointly examine harvest date, postharvest 1-MCP, and storage time/conditions. The quality of apples in commercial supply chains arises from interactions, not merely the additive effects of single variables. Harvest date sets the physiological starting point and the potential responsiveness to ethylene inhibitors; 1-MCP modifies ethylene sensitivity and biosynthesis, stabilizing firmness and limiting acid degradation; and storage time and atmosphere (together with shelf life exposure) determine the rate of cumulative quality changes. Only a joint analysis allows us to estimate the relative effect sizes (η^2) and to identify true synergies and trade-offs (e.g., delaying softening without excessive flavor loss) under conditions that mimic long transport and commercial handling. In fruit production and export, this knowledge helps select appropriate treatments and methods, enabling better planning of storage and logistics for specific apple cultivars.

A more complete understanding of the mechanisms that shape the quality of fruit requires the use of statistical tools that allow the identification and hierarchization of predictors. In this context, stepwise regression allows for the selection of variables with the greatest impact on the dependent variable while eliminating predictors of low statistical

significance. The analysis is complemented by the use of partial eta squared (η^2), which allows for determination of the percentage share of a given variable in explaining the total variance of the trait studied, with control of other factors. Unlike classic significance tests, η^2 allows for comparison of the strength of an effect between variables that differ in scope, scale, or nature (continuous or categorical), making it a particularly useful tool in multivariate analyses.

Therefore, the objective of this study was to assess the impact of selected pre- and post-harvest factors, i.e., harvest date, 1-MCP treatments, storage technology used, storage length, shelf life, and selected atmospheric factors, on the quality of 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples in two consecutive storage seasons. The qualitative traits analyzed included firmness (F), titratable acidity (TA), soluble solid content (SSC), SSC/TA ratio, and ACC content. In this study, multiple stepwise regression and effect size analysis (partial eta squared) were applied to determine each factor's contribution to the variance in the results, enabling clear identification of those that most strongly shaped the quality parameters.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material and Experimental Design

The tests were carried out on 'Gala Schniga® SchniCo Red(s)' apples during the storage seasons 2022/2023 and 2023/2024. The fruit came from trees grown at the Warsaw University of Life Sciences (52°14' N, 21°1' E); the trees were grafted on M.9 rootstock and planted in 2014 at a spacing of 3.0 × 1.0 m. The orchard had no drip irrigation, and trees were trained in a slender spindle system. The experiment followed a previously validated methodology [21], adapted to the conditions of two consecutive seasons. The weather data on the plot were gathered using the Davis Vantage Pro weather station installed in the experimental plot.

In each season, the fruit was harvested at two maturity stages determined on the basis of the Streif index [21,22]. In the 2022/2023 season, the optimal harvest date (OHD) was 13 September 2022—122 days after full bloom (DAFB), while the delayed harvest (DH-136 DAFB) was carried out on 27 September 2022. In the 2023/2024 season, the relevant dates were 12 September 2023 (OHD; 121 DAFB) and 26 September 2023 (DH; 135 DAFB). Seven days before the optimal harvest date (OHD - 7), 100 trees were sprayed with 1-MCP (Harvista™, AgroFresh Solutions Inc., Philadelphia, PA, USA; 150 g·ha⁻¹). At OHD, fruit were harvested and held for 7 d in air at 1 °C; then the samples were subjected to postharvest 1-MCP (SmartFresh™ ProTabs, AgroFresh Solutions Inc., Philadelphia, PA, USA; 0.65 µL·L⁻¹).

Four variants of fruit treatment with preparations containing 1-MCP were used:

- Control—0 µL·L⁻¹ 1-MCP (no 1-MCP treatment),
- Harvista™ (1-MCP treatment before harvest),
- SmartFresh™ (1-MCP treatment after harvest),
- Harvista™ + SmartFresh™ (1-MCP treatment both before and after harvest).

The fruit was stored at a temperature of 1 °C and a relative humidity of approximately 95% under controlled conditions using two storage technologies: ULO (Ultra Low Oxygen; 1.2% CO₂ and 1.2% O₂) and DCA (Dynamic Controlled Atmosphere; 0.6% CO₂ and 0.6% O₂). The storage periods were 5, 7, or 9 months at a temperature of 1 °C and RH-95%, followed by simulated trading for 0 or 7 days at 20 °C. Normal (air) atmosphere (NA) storage was not included because, for Polish 'Gala' apples, the commercial practice is predominantly export to distant markets, for which NA does not sustain apple quality long enough to meet shipping and retail windows. Growers typically rely on ULO/DCA regimes following ethylene-management treatments to maintain firmness, color, and disorder

control during prolonged distribution. Our experimental design therefore mirrors current industry practice and the intended use case of the proposed decision framework.

In each experimental treatment, the quality of apples was evaluated in four replicates, with ten fruits in each. The following factors were taken into account in the experiment:

- Use of 1-MCP treatment before harvest (Harvista™: used/not used);
- Harvest date (optimal/delayed);
- Use of 1-MCP treatment after harvest (SmartFresh™: used/not used);
- Storage technology (ULO or DCA);
- Storage period (5, 7, or 9 months);
- The length of the simulated trading (shelf life) (0 or 7 days).

All possible combinations of these factors resulted in a total of 96 experimental groups in each study season, which translated into a total of 192 groups throughout the two-year experimental cycle.

Although the layout and the course of the experiment—including the composition of the atmosphere, the doses of preparations, and the storage method—remained consistent with the previously described methodology [21,22], the aim of this study was to identify the key factors influencing the quality of apples during storage using step regression and to assess the strength of their influence using the partial eta squared method (η^2).

2.2. Selection of Variables for the Regression Model

In order to identify the most important factors influencing the selected quality parameters of the ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples, a stepwise regression method was used taking into account the backward elimination procedure. This method allows for the selection of independent variables by removing from the model those predictors that show the least statistical influence on the variable under analysis.

The initial regression model considered all potential independent variables: the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, the date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period in months, and shelf life. The selection of weather parameters was based on studies conducted by Lachapelle et al. [42] These variables were numerically encoded to enable the use of regression analysis and the calculation of the effect size. Depending on the nature of a given feature, binary coding (e.g., 1-MCP treatment/no 1-MCP treatment) or categorical coding (e.g., storage period: 5, 7, or 9 months) was used. A detailed description of the independent variables, their variants, and the assigned numerical codes is presented in Table 1.

In the subsequent steps of the analysis, the least significant variables were removed based on the *p*-values until a model covering only the relevant predictors was obtained (with a significance level of $\alpha = 0.05$). The analysis was performed separately for each of the five dependent variables: flesh firmness (Instron 5542, Instron, Norwood, MA, USA), soluble solids content (Atago, Palette PR-32, Atago, Co., Ltd., Tokyo, Japan), titration acidity (TitroLine 5000, Xylem Analytics Germany GmbH, Weilheim, Germany), soluble solids-to-titration acidity ratio (SSC/TA), and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) content (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA). Detailed procedures for the determination of these parameters, except ACC content, have been described in two publications by Małachowska and Tomala [21,22]. ACC content was determined according to the procedures described by Buffer [43] and Lizada and Yang [44], taking into account the modifications proposed by Jobling et al. [45], wherein gas samples for C₂H₄ analysis were collected after 15 min, and ACC was calculated based on the percent recovery of ACC from spiked samples.

Table 1. Independent variables included in statistical models and their variants and assigned numerical codes used in regression analysis and partial effect size calculations (η^2). Independent variables included in the statistical models, their categorical variants, and corresponding numerical codes used in regression analysis and partial eta squared (η^2) effect size calculations.

Independent Variables		Category	Code
Number of days with an average air temperature below 15 °C in the last 30 (or 44) days before harvest (X_1) *	2022/2023	optimal harvest date	13
		delayed harvest	25
	2023/2024	optimal harvest date	1
		delayed harvest	3
Number of days when cumulated precipitation was above 6 mm (X_2) *	2022/2023	optimal harvest date	22
		delayed harvest	22
	2023/2024	optimal harvest date	15
		delayed harvest	17
1-MCP treatment before harvest (X_3)	without treatment	0	
	with treatment	1	
Date of harvest (X_4)	optimal harvest date	0	
	delayed harvest	1	
1-MCP treatment after harvest (X_5)	without treatment	0	
	with treatment	1	
Storage technology (X_6)	ULO (Ultra Low Oxygen)	0	
	DCA (Dynamic Controlled Atmosphere)	1	
Storage period (X_7)	5 months	5	
	7 months	7	
	9 months	9	
Shelf life (X_8)	0 days (directly after storage)	0	
	7 days	1	

* Code explanation: Values indicate the number of days meeting the condition in the last 30 (or 44) days preharvest (e.g., OHD: 13 in 2022/23 and 1 in 2023/24; DH: 25 and 3); for “days with cumulated precipitation > 6 mm,” OHD and DH counts were identical (e.g., both 22 in 2022/23), meaning no >6 mm days occurred between OHD and DH.

The analysis was complemented by an assessment of the effect size of individual independent variables using partial eta squared (η^2). This indicator determines the percentage of variance of the dependent variable that can be assigned to a particular independent variable, while controlling the impact of the other variables included in the model. The value of the η^2 coefficient is in the range of 0 to 1, with values closer to 1 indicating a stronger influence of the analyzed factor. In the article, the values of η^2 are presented as a percentage (%), which allows for a direct comparison of the relative strength of the influence of individual variables on the evaluated quality characteristics of apples [46].

2.3. Statistical Analysis

A multiple stepwise regression analysis was performed to assess the influence of selected factors on the dependent variables. The model included the following predictors: the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, the date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, months of storage, and shelf life. Both unstandardized and standardized β coefficients (unstandardized: change in the dependent variable per one-unit change in the predictor; standardized: effect size in standard-deviation units enabling comparison across predictors), with corresponding p -values, were reported. Statistical significance was set at $p < 0.05$. Additionally, partial eta squared (η^2) values were calculated to quantify effect sizes.

All statistical analyses were carried out using Statistica version 13.3 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) and IBM SPSS version 26 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

3. Results

3.1. Weather Conditions During the Growing Seasons of 2022 and 2023

Figures 1 and 2 show the average monthly air temperatures and precipitation totals recorded at the orchard meteorological station in Wilanów (N 52°9′36.1″, E 21°5′58.2″) from April to September in 2022 and 2023. Data are presented in the form of climatodiagrams developed according to the method of Walter and Lieth [47] consisting of a graphical presentation of average monthly temperatures and precipitation totals at a 1 °C: 4.5 mm proportion. This allowed for the identification of wet periods (when the precipitation line runs above the temperature line—blue fields) and dry periods (when the temperature line is above the precipitation line—yellow fields).

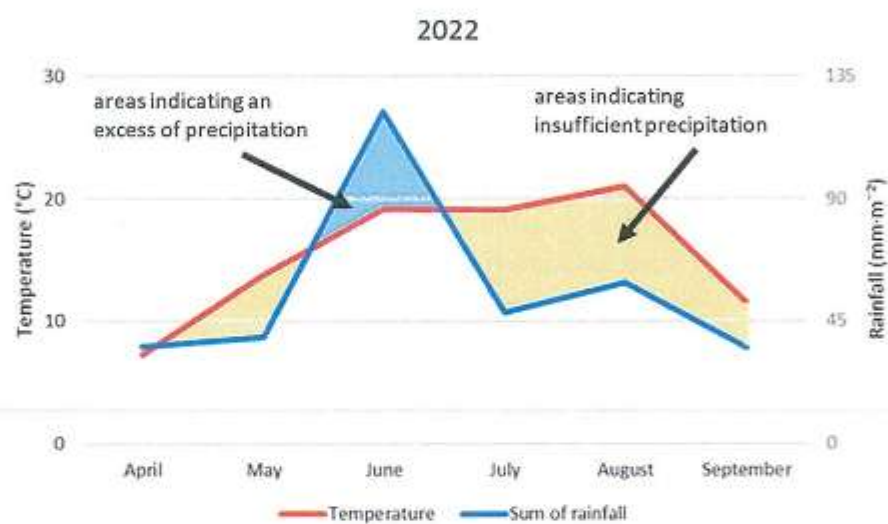


Figure 1. Average monthly temperatures and total rainfall in 2022 from April to September for the Wilanów station, Warsaw, Poland (N 52°9′36.1″, E 21°5′58.2″). Areas indicating an excess of precipitation—cumulative monthly precipitation exceeds 4.5 mm per 1 °C of mean monthly temperature (i.e., $>4.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$). Areas indicating insufficient precipitation—this value is $<4.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$.

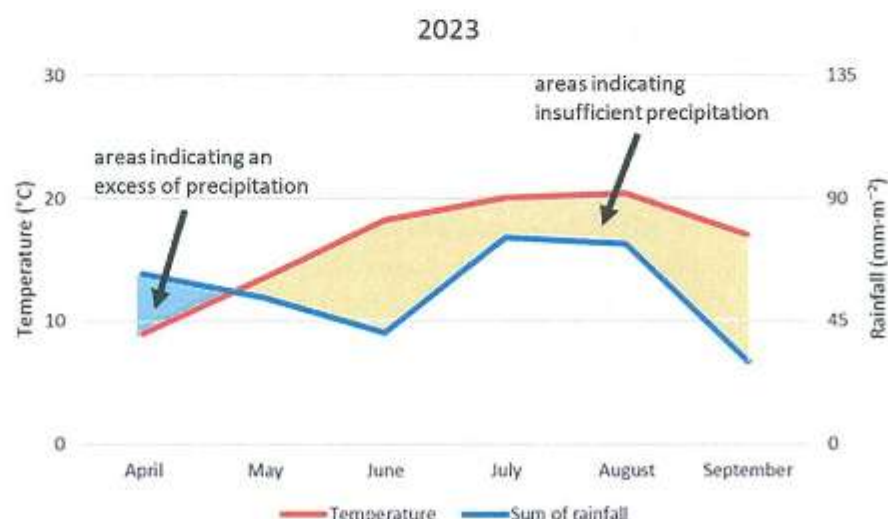


Figure 2. Average monthly temperatures and total rainfall in 2023 from April to September for the Wilanów station, Warsaw, Poland (N 52°9′36.1″, E 21°5′58.2″). Areas indicating an excess of precipitation—cumulative monthly precipitation exceeds 4.5 mm per 1 °C of mean monthly temperature (i.e., $>4.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$). Areas indicating insufficient precipitation—this value is $<4.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$.

In 2022 (Figure 1), the growing season was characterized by a gradual increase in average temperature—from about 7 °C in April to a maximum of about 21 °C in August—before it dropped to about 13 °C in September. The highest monthly precipitation occurred in June (more than 120 mm), which resulted in a periodic excess of precipitation in relation to temperature (marked in blue on the graph). On the other hand, from July to September, total precipitation remained below average temperatures, which means that there was a precipitation shortage in this period (drought period—marked in yellow). Therefore, the distribution of rainfall was uneven—an excess in June and a shortage in the subsequent part of the season—which could lead to limited water availability in the soil, especially during the key phases of fruit growth during the summer months. From April to September, 22 days with precipitation exceeding 6 mm were recorded, which could have had a positive effect on the availability of water in the soil during fruit growth. In the case when apples were harvested at the optimal date, there were 13 days with an average temperature below 15 °C within the last 30 days before the harvest, while in the case of delayed harvest, there were as many as 25 such days within 44 days before the harvest. Lower temperature during this period may have had a positive effect on the quality of apples, favoring slower and more uniform ripening of the fruit.

In 2023 (Figure 2), the course of the temperatures in the growing season was similar to the previous year's—from about 9 °C in April to a maximum of approximately 21 °C in August, followed by a slight decrease to approximately 17 °C in September. The distribution of precipitation was characterized by different dynamics—an excess of precipitation in relation to temperature (marked in blue on the graph) was recorded in April only, while a precipitation shortage (areas marked in yellow) prevailed from May to September, despite the persistence of high temperatures.

From April to September 2023, 15 days with precipitation exceeding 6 mm were recorded in the case of harvest at the optimal date, and 17 days in the case of delayed harvest. Only 1 day with an average temperature below 15 °C was recorded during 30 days preceding the harvest at the optimal date, while there were 3 such days in the case of delayed harvest (that is, during 44 days before harvest). High temperatures before harvest may have accelerated fruit ripening, while limited rainfall in most of the season may have increased the risk of water stress, especially between May and June and at the end of the season.

By comparing the two seasons, 2023 was generally warmer and drier than 2022, especially in the second half of the growing season. The observed differences could have significantly affected the growth rate of the fruit, the level of water stress, and the quality of the apples during storage.

Table 2 presents descriptive statistics for the quality parameters of the 'Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)' apples from the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons. The greatest variability was observed for firmness, which ranged from 33.0 to 83.8 N (mean = 59.5 N; SD = 12.4). The high value of the coefficient of determination ($R^2 = 0.92$; R^2 corrected = 0.85) indicates a very good fit of the regression model to this parameter.

The titration acidity ranged from 0.14 to 0.36% (mean = 0.26%; SD = 0.04), and the resulting model was characterized by a good fit ($R^2 = 0.77$; R^2 adjusted = 0.60). SSC ranged from 11.5 to 16.2 °Bx (mean = 13.3 °Bx; SD = 0.6). Despite the slight variability, the regression model showed a limited ability to explain this parameter ($R^2 = 0.61$; R^2 adjusted = 0.36), which may indicate a significant influence of environmental or cultivar-related factors.

The SSC/TA ratio ranged from 39.0 to 94.0 (average = 51.5; SD = 8.0), with a moderate regression model fit ($R^2 = 0.73$; R^2 adjusted = 0.53). The obtained ACC content range was wide (0.001–1.12 nmol·kg⁻¹), with an average of 0.18 nmol·kg⁻¹ and a standard deviation of 0.16. The regression model for this parameter was characterized by good predictive

accuracy ($R^2 = 0.61$; R^2 adjusted = 0.37), indicating a significant influence of experimental factors on the content of this acid.

Table 2. Descriptive statistics of the results obtained from analyses of Gala apples in the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

Indicator	<i>n</i>	Min.	Max.	Average	SD	R^2	Adjusted R^2
Firmness (N)		33.0	83.8	59.5	12.4	0.92	0.85
Titrateable acidity (% malic acid)		0.14	0.36	0.26	0.04	0.77	0.60
Soluble solids content ($^{\circ}$ Bx)	768	11.5	16.2	13.3	0.60	0.61	0.36
SSC/TA		39.0	94.0	51.5	8.00	0.73	0.53
ACC content ($\text{nmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)		0.00	1.12	0.18	0.16	0.61	0.37

SD—standard deviation. Model fit was summarized with R^2 and adjusted R^2 (which corrects for the number of predictors and sample size).

3.2. Firmness (F)

The results of the stepwise multiple regression analysis (Table 3) indicate that all variables included in the final model had a significant effect on the firmness of the ‘Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)’ apples ($p < 0.001$). Storage technology was eliminated during the stepwise procedure due to a lack of significance. The final regression equation allows us to determine the direction and strength of the influence of individual predictors on flesh firmness.

Table 3. Results of the stepwise multiple regression analysis for the firmness of ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, the date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. ($n = 768$.) This research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients β	<i>p</i>
	β	SE *		
Constant			37.91	<0.001
Number of days with an average air temperature below 15 °C in the last 30 (or 44) days before harvest	0.370	0.045	0.284	<0.001
Number of days when cumulated precipitation was above 6 mm	1.152	0.130	0.286	<0.001
1-MCP treatment before harvest	4.161	0.346	0.168	<0.001
Date of harvest	−9.136	0.346	−0.368	<0.001
1-MCP treatment after harvest	14.731	0.346	0.594	<0.001
Storage period	−0.647	0.106	−0.085	<0.001
Shelf life	−5.237	0.346	−0.211	<0.001

* SE—standard error.

The application of 1-MCP after harvest had the strongest positive effect on F ($\beta = 0.594$), with the application of 1-MCP before harvest showing a weaker effect ($\beta = 0.168$). The number of days with precipitation above 6 mm ($\beta = 0.286$) and the number of days with the average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest ($\beta = 0.284$) also had a significant positive effect. These results suggest that the weather conditions in the final phase of the growing season may have been conducive to maintaining higher flesh firmness.

On the other hand, the harvest date ($\beta = -0.368$), storage ($\beta = -0.085$), and shelf life after storage ($\beta = -0.211$) had a negative effect on fruit firmness. Particularly important was the influence of a later harvest date and a longer storage period, which were associated with a decrease in flesh firmness.

The resulting regression equation is as follows:

$$F = (0.37 \times X_1) + (1.15 \times X_2) + (4.16 \times X_3) + (-9.14 \times X_4) + (14.7 \times X_5) + (-0.65 \times X_7) + (-5.24 \times X_8) + 37.9 \quad (1)$$

where X_1 —number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest; X_2 —number of days when cumulative precipitation was above 6 mm; X_3 —1-MCP treatment before harvest; X_4 —date of harvest; X_5 —1-MCP treatment after harvest; X_7 —storage period; X_8 —shelf life.

A complementary analysis of the eta squared coefficient (η^2 , Table 4) confirmed the significance of most of the variables included in the model that describes the firmness of ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples. The application of 1-MCP after harvest had the greatest explanatory strength for flesh firmness variability ($\eta^2 = 70.4\%$), which clearly indicates the dominant role of the use of this preparation in maintaining fruit firmness after storage.

Table 4. Results of the eta squared (η^2) analysis for firmness of ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, the date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

Independent Variables	η^2 (%) *	<i>p</i>
Number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest	9.1	<0.001
Number of days when cumulated precipitation was above 6 mm	36.2	<0.001
1-MCP treatment before harvest	15.9	<0.001
Date of harvest	47.8	<0.001
1-MCP treatment after harvest	70.4	<0.001
Storage period	4.7	<0.001
Shelf life	23.1	<0.001

* Method note (effect sizes). Partial η^2 values quantify variance attributed to each factor controlling for others. $\eta_p^2 = SS_{effect} / (SS_{effect} + SS_{error})$. Consequently, partial η^2 do not sum to 100%. The constant is not an effect.

The harvest date ($\eta^2 = 47.8\%$) and the number of days with precipitation exceeding 6 mm ($\eta^2 = 36.2\%$) also showed a significant impact on firmness, probably due to the weather conditions in the final phase of the growing season and the degree of ripeness of apples. The duration of simulated trade (shelf life) accounted for 23.1% of the firmness variation, while the use of 1-MCP before harvest had a moderate but significant effect ($\eta^2 = 15.9\%$).

The number of days with the average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest accounted for 9.1% of the firmness variation. Storage duration showed a marginal but significant effect ($\eta^2 = 4.7\%$).

The analysis confirmed that the application of 1-MCP after harvest is the most effective single factor determining the maintenance of firmness of ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples. The harvest date, the weather conditions during the last 30 (or 44) days before harvest, the storage period, and trade duration (shelf life) have also shown a significant impact,

highlighting the importance of a comprehensive approach to fruit quality management in the post-harvest period.

The effect of treatment, harvest date, length of storage, and storage conditions separately for both years of the study on firmness was analyzed by analysis of variance and is presented in the Supplementary Materials [Tables S1–S8].

3.3. Titratable Acidity (TA)

The stepwise multiple regression analysis (Table 5) showed a significant effect of six independent variables on the TA of the ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples ($p < 0.001$), with atmospheric conditions rejected at the modeling stage due to lack of significance. The use of 1-MCP after harvest ($\beta = 0.496$), followed by storage technology ($\beta = 0.113$) and the use of 1-MCP before harvest ($\beta = 0.089$) were found to have the strongest effects on maintaining acidity, which confirms that the ethylene inhibitor effectively slows the ripening process, allowing for the preservation of higher acidity of apples. The following factors had a negative impact on TA: storage period ($\beta = -0.383$), harvest date ($\beta = -0.381$) and shelf life after storage ($\beta = -0.203$). These results indicate that delayed harvest, extended shelf life, and additional exposure under shelf life conditions led to a decrease in apple acidity, which is consistent with the typical dynamics of organic acid consumption in the respiration process. All of the factors related to post-harvest treatment, such as the use of 1-MCP and storage technology, and the reduction in storage period and trade duration, play a key role in maintaining the taste quality of apples by stabilizing their acidity.

Table 5. Results of the stepwise multiple regression analysis for titratable acidity (TA) of ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C, within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, the date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. ($n = 768$). The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients β	p
	β	SE *		
Constant			0.322	<0.001
1-MCP treatment before harvest	0.007	0.002	0.089	<0.001
Date of harvest	−0.030	0.002	−0.381	<0.001
1-MCP treatment after harvest	0.038	0.002	0.496	<0.001
Storage technology	0.009	0.002	0.113	<0.001
Storage period	−0.009	0.001	−0.383	<0.001
Shelf life	−0.016	0.002	−0.203	<0.001

* SE—standard error.

The resulting regression equation is as follows.

$$TA = (0.01 \times X_3) + (-0.03 \times X_4) + (0.04 \times X_5) + (0.01 \times X_6) + (-0.01 \times X_7) + (-0.02 \times X_8) + 0.32 \quad (2)$$

where X_3 —1-MCP treatment before harvest; X_4 —date of harvest; X_5 —1-MCP treatment after harvest; X_6 —storage technology; X_7 —storage period; X_8 —shelf life.

Partial eta squared analysis (Table 6) showed that the most relevant factor shaping the TA of the ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples was the post-harvest use of 1-MCP, which accounted for 38.0% of the variability explained, highlighting its key role in slowing the ripening and maintaining higher levels of organic acids during storage. Storage period (26.8%) and harvest date (26.6%) also had a significant impact on TA, confirming the

observation that a longer storage period and later harvest lead to greater loss of acidity. Trade duration after storage (9.3%) affected TA moderately but significantly, while 1-MCP treatment before harvest (2.0%) and the storage technology used (3.1%) contributed to a relatively small extent to the variability of TA, although their effects were statistically proven ($p < 0.001$). Atmospheric factors, including the number of days with an average temperature below 15 °C within the last 30–44 days before harvest and the number of days with precipitation above 6 mm, did not show a significant effect, suggesting that the variability of weather conditions during the final stage of the growing season was less significant for TA than the factors related to fruit harvesting and storage.

Table 6. Results of the eta squared (η^2) analysis for titratable acidity (TA) of ‘Gala’ apples based on a model including 1-MCP treatment before harvest, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

Independent Variables	η^2 (%) *	p
1-MCP treatment before harvest	2.0	<0.001
Date of harvest	26.6	<0.001
1-MCP treatment after harvest	38.0	<0.001
Storage technology	3.1	<0.001
Storage period	26.8	<0.001
Shelf life	9.3	<0.001

* Method note (effect sizes). Partial η^2 values quantify variance attributed to each factor controlling for others, $\eta_p^2 = SS_{\text{effect}} / (SS_{\text{effect}} + SS_{\text{error}})$. Consequently, partial η^2 do not sum to 100%. The constant is not an effect.

3.4. Soluble Solids Content (SSC)

The stepwise multiple regression analysis (Table 7) showed that SSC in apples was primarily determined by the application of 1-MCP, the harvest date, the storage period, and the trade period, while the number of days with an average temperature below 15 °C, the number of days with precipitation above 6 mm, and storage technology were eliminated from the model due to lack of significance. The application of 1-MCP before harvest ($\beta = -0.387$), a delayed harvest date ($\beta = -0.229$) and a longer shelf life ($\beta = -0.212$) had the strongest negative effect on SSC, while a positive effect was observed for the use of 1-MCP after harvest ($\beta = 0.314$) and trade period (shelf life, $\beta = 0.130$), suggesting that the dynamics of SSC changes can lead to either an increase or a decrease in SSC depending on the combination of these factors, reflecting the typical carbohydrate metabolism and sugar concentration during the ripening and storage of fruit.

The resulting regression equation is as follows:

$$\text{SSC} = (-0.48 \times X_3) + (-0.29 \times X_4) + (0.39 \times X_5) + (-0.08 \times X_7) + (0.16 \times X_8) + 13.9 \quad (3)$$

where X_3 —1-MCP treatment before harvest; X_4 —date of harvest; X_5 —1-MCP treatment after harvest; X_7 —storage period; X_8 —shelf life.

The partial eta squared (η^2) analysis (Table 8) showed that the influence of the investigated variables on SSC was significantly lower than on firmness or TA. The use of 1-MCP before harvest ($\eta^2 = 22.7\%$), which limits the accumulation of sugars in fruit, contributed most to explaining SSC variation, while 1-MCP after harvest also showed a significant effect ($\eta^2 = 16.2\%$), acting in the opposite way and supporting the maintenance of SSC. Storage ($\eta^2 = 8.5\%$) and harvest period ($\eta^2 = 9.3\%$) had a moderate but statistically proven effect, indicating that the storage period and the stage of ripeness at harvest shape the final SSC in the fruit’s flesh. The shelf life effect was marginal but significant ($\eta^2 = 3.2\%$ ($p < 0.001$)),

which could have been due to transpiration and concentration of juice during trade, while storage technology ($\eta^2 = 0.5\%$; $p = 0.061$) and weather conditions did not have a significant impact and were not included in the model.

Table 7. Results of the stepwise multiple regression analysis for soluble solids content (SSC) of ‘Gala’ apples based on a model number of days in the last 30 (or 44) days before harvest with an average air temperature below 15 °C, number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, month of storage, and days of shelf life. ($n = 768$). The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients β	p
	β	SE *		
Constant			13.9	<0.001
1-MCP treatment before harvest	−0.481	0.036	−0.387	<0.001
Date of harvest	−0.285	0.036	−0.229	0.011
1-MCP treatment after harvest	0.390	0.036	0.314	<0.001
Storage period	−0.081	0.011	−0.212	<0.001
Shelf life	0.162	0.036	0.130	<0.001

* SE—standard error.

Table 8. Results of the eta squared (η^2) analysis for soluble solids content (SSC) of ‘Gala’ apples based on a model including 1-MCP treatment before harvest, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

Independent Variables	η^2 (%) *	p
1-MCP treatment before harvest	22.7	<0.001
Date of harvest	9.3	0.011
1-MCP treatment after harvest	16.2	<0.001
Storage technology	0.5	0.061
Storage period	8.5	<0.001
Shelf life	3.2	<0.001

* Method note (effect sizes). Partial η^2 values quantify variance attributed to each factor controlling for others, $\eta_p^2 = SS_{effect} / (SS_{effect} + SS_{error})$. Consequently, partial η^2 do not sum to 100%. The constant is not an effect.

3.5. SSC/TA Ratio

The SSC/TA ratio, illustrating the balance between the sweetness and the acidity of apples, was shaped by seven significant variables included in the final stepwise multiple regression model (Table 9). According to the literature, the optimal range for the ‘Gala’ cultivar should fall between 20 and 60 [48]. All factors showed a very significant effect ($p < 0.001$), except for the number of days with a temperature below 15 °C within the last 30 or 44 days before harvest, whose effect was weaker but also significant ($p = 0.034$). Harvest date ($\beta = 0.332$), storage time ($\beta = 0.345$), and shelf life ($\beta = 0.258$) were found to have the strongest positive effect on SSC/TA, indicating that fruit harvested later, stored longer, and displayed longer under marketing conditions was characterized by a higher predominance of sweetness over acidity. On the other hand, 1-MCP applied after harvest lowered the SSC/TA value the most ($\beta = -0.427$), which was associated with a lower consumption of organic acids during respiration. The same, although to a lesser degree, was found for 1-MCP before harvest ($\beta = -0.233$) and storage technology ($\beta = -0.097$).

Table 9. Results of the stepwise multiple regression analysis for SSC/TA ratio of ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period and shelf life. ($n = 768$). This research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients β	p
	β	SE *		
Constant			41.576	<0.001
Number of days in the last 30 (or 44) days before harvest with an average air temperature below 15 °C	−0.047	0.022	−0.057	0.034
1-MCP treatment before harvest	−3.701	0.395	−0.233	<0.001
Date of harvest	5.281	0.424	0.332	<0.001
1-MCP treatment after harvest	−6.794	0.395	−0.427	<0.001
Storage technology	−1.539	0.395	−0.097	<0.001
Storage period	1.681	0.121	0.345	<0.001
Shelf life	4.102	0.395	0.258	<0.001

* SE—standard error.

The resulting regression equation is as follows:

$$\text{SSC/TA} = (-0.05 \times X_1) + (-3.70 \times X_3) + (5.28 \times X_4) + (-6.79 \times X_5) + (-1.54 \times X_6) + (1.68 \times X_7) + (4.10 \times X_8) + 41.6 \quad (4)$$

where X_1 —number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest; X_3 —1-MCP treatment before harvest; X_4 —date of harvest; X_5 —1-MCP treatment after harvest; X_6 —storage technology; X_7 —storage period; X_8 —shelf life.

The importance of individual predictors for the formation of the SSC/TA ratio was confirmed by the effect size analysis (Table 10). The highest value of the η^2 coefficient was obtained for the use of 1-MCP after harvest ($\eta^2 = 35.4\%$), indicating the dominant effect of this treatment on the SSC/TA ratio. Other important factors were the storage period ($\eta^2 = 26.4\%$) and the harvest date ($\eta^2 = 22.5\%$), the influence of which can be associated with the progressive ripening of the fruit in the orchard and under storage conditions, resulting in a decrease in acidity and/or an increase in SSC, and thus in an increase in SSC/TA. The shelf life ($\eta^2 = 16.7\%$) and the use of 1-MCP before harvest ($\eta^2 = 14.0\%$), which—unlike the post-harvest treatment—reduced the SSC in the fruit, also played a significant role. The number of days with temperatures below 15 °C before harvest showed a smaller but significant effect ($\eta^2 = 4.4\%$; $p < 0.001$), indicating a possible influence of atmospheric conditions in the final phase of apple growth on their flavor profile. Storage technology was the least important predictor ($\eta^2 = 2.7\%$), which, despite its statistical significance, played a relatively minor role in the model.

Table 10. Results of the eta squared (η^2) analysis for SSC/TA ratio of ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, 1-MCP treatment before, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

Independent Variables	η^2 (%) *	p
Number of days in the last 30 (or 44) days before harvest with an average air temperature below 15 °C	4.4	<0.001
1-MCP treatment before harvest	14.0	<0.001
Date of harvest	22.5	<0.001

Table 10. Cont.

Independent Variables	η^2 (%) *	<i>p</i>
1-MCP treatment after harvest	35.4	<0.001
Storage technology	2.7	<0.001
Storage period	26.4	<0.001
Shelf life	16.7	<0.001

* Method note (effect sizes). Partial η^2 values quantify variance attributed to each factor controlling for others, $\eta_p^2 = SS_{effect} / (SS_{effect} + SS_{error})$. Consequently, partial η^2 do not sum to 100%. The constant is not an effect.

3.6. 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylic Acid (ACC)

Eight independent variables were considered in a model describing the content of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC), a precursor to ethylene in fruit, six of which showed a significant effect on ACC in ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples (Table 11). The strongest stimulating effects were reported for storage length ($\beta = 0.326$), shelf life ($\beta = 0.204$), and storage technology ($\beta = 0.181$), which indicates that longer storage and simulated trade promote higher ACC content, reflecting the activation of ethylene synthesis during fruit ripening and aging. The only limiting factor for ACC production was the post-harvest use of 1-MCP ($\beta = -0.413$), confirming its effectiveness in inhibiting ethylene synthesis and slowing down the ripening process. Harvest date ($\beta = 0.144$) also showed a positive effect, suggesting higher ACC content in fruit harvested later, which may be due to more advanced physiological maturity. The number of days with temperatures below 15 °C within the last 30 or 44 days before harvest ($\beta = -0.078$; $p = 0.012$) had a small but significant effect, indicating lower metabolic activity of apples grown in cooler conditions. The number of days with precipitation above 6 mm and 1-MCP before harvest were eliminated from the model as statistically insignificant.

Table 11. Results of the stepwise multiple regression analysis for 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) content in ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, the number of days when cumulated precipitation was above 6 mm, 1-MCP treatment before harvest, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. ($n = 768$). This research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients β	<i>p</i>
	β	SE *		
Constant			−0.052	0.023
Number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest	−0.001	0.001	−0.078	0.012
Date of harvest	0.047	0.010	0.144	<0.001
1-MCP treatment after harvest	−0.135	0.009	−0.413	<0.001
Storage technology	0.059	0.009	0.181	<0.001
Storage period	0.033	0.003	0.326	<0.001
Shelf life	0.067	0.009	0.204	<0.001

* SE—standard error.

The resulting regression equation is as follows:

$$ACC = (-0.001 \times X_1) + (0.03 \times X_4) + (-0.14 \times X_5) + (0.06 \times X_6) + (0.03 \times X_7) + (0.07 \times X_8) - 0.05 \tag{5}$$

where X_1 —number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest; X_4 —date of harvest; X_5 —1-MCP treatment after harvest; X_6 —storage technology; X_7 —storage period; X_8 —shelf life.

The interpretation of the regression model is complemented by the effect size analysis (Table 12), which unequivocally confirms the dominant role of post-harvest factors in shaping the ACC content in the ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples. The use of 1-MCP after harvest ($\eta^2 = 21.3\%$) contributed most to explaining the variation in ACC content, confirming its efficacy in blocking ethylene biosynthesis and delaying the ripening process, thus making it the most important factor limiting ACC accumulation. Another important predictor was storage period ($\eta^2 = 14.4\%$), indicating a gradual increase in ACC with storage time, probably as a result of increasing metabolic activity of the fruit. Shelf life also affected the growth of ACC content ($\eta^2 = 6.2\%$) and so did storage technology, albeit to a lesser extent—its impact was significant ($\eta^2 = 4.9\%$), suggesting the influence of storage conditions on the ACC accumulation rate. Harvest date ($\eta^2 = 2.1\%$) and the number of days with temperatures below 15 °C within the last 30 or 44 days before harvest ($\eta^2 = 1.9\%$) had a limited but significant effect, indicating the role of orchard conditions in shaping the initial ACC content. At the same time, the application of ACC before harvest did not significantly affect the ACC content ($\eta^2 = 0.0\%$; $p = 0.726$), which means that its effects did not limit ACC biosynthesis during storage. In conclusion, the η^2 analysis showed that the main factors determining the ACC content were the storage period, the shelf life, and post-harvest 1-MCP treatment, which indicates that effective control of ACC production and ethylene synthesis is possible primarily through the management of shelf life and the use of an ethylene inhibitor after apple harvest. The separate effects of treatment, harvest date, length of storage, and storage conditions on ACC content for both years of the study were analyzed by analysis of variance and are presented in the Supplementary Materials [Tables S9–S16].

Table 12. Results of the eta squared (η^2) analysis for 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) content in ‘Gala’ apples based on a model including the number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest, 1-MCP treatment before harvest, date of harvest, 1-MCP treatment after harvest, storage technology, storage period, and shelf life. The research was conducted during the 2022/2023 and 2023/2024 storage seasons.

Independent Variables	η^2 (%) *	<i>p</i>
Number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest	1.9	<0.001
1-MCP treatment before harvest	0.0	0.726
Date of harvest	2.1	<0.001
1-MCP treatment after harvest	21.3	<0.001
Storage technology	4.9	<0.001
Storage period	14.4	<0.001
Shelf life	6.2	<0.001

* Method note (effect sizes). Partial η^2 values quantify variance attributed to each factor controlling for others, $\eta_p^2 = SS_{\text{effect}} / (SS_{\text{effect}} + SS_{\text{error}})$. Consequently, partial η^2 do not sum to 100%. The constant is not an effect.

4. Discussion

The analyses clearly indicate that maintaining high post-harvest quality in ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples requires an integrated approach that combines an optimal harvest date, an appropriate storage technology, and the use of 1-MCP. Determining the optimal harvest date largely relies on the ethylene concentration in the seed cavities, which should be 0.1–0.5 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$. The most effective single factor influencing firmness, acidity, and ACC content was the use of 1-MCP after harvest (SmartFresh™), whose contribution to explaining the variability was 70.4% for firmness, 38.0% for titration acidity, and 21.3% for ACC content. These results confirm the high efficacy of 1-MCP in blocking ethylene receptors and slowing maturation [49–51], which is particularly important in the case of cultivars prone to early firmness loss.

Thanks to the use of 1-MCP, it was possible to maintain the firmness of apples above the threshold of 55 N, which is considered the minimum value accepted by consumers [3,7], even after 9 months of storage and a shelf life period. The effectiveness of the treatment was further enhanced

by favorable weather conditions before harvest in 2022—a higher number of cold days (below 15 °C) and precipitation (above 6 mm)—which significantly affected firmness ($\eta^2 = 9.1\%$ and 36.2%). These observations are consistent with previous studies showing that precipitation and temperatures in the final stage of fruit development can significantly shape the quality characteristics of apples, including firmness [52]. For example, precipitation between 61 and 90 days after full flowering explained up to 39% of the variation in the firmness of ‘McIntosh’ apples [42].

Importantly, both cold conditions and heat stress can modify the intensity of ethylene biosynthesis. As shown by Sharma et al. [53] and Honda et al. [54], high temperatures before harvest can interfere with the production and performance of ethylene, leading to irregular ripening and deterioration of fruit firmness and flavor. Paul and Chen [55], on the other hand, noted that short-term exposure to heat shock can have both beneficial and adverse effects, depending on the time and intensity of treatment. In our own studies (unpublished data), a small number of hot days (>25 °C) in the second half of the growing season was found to promote the proper course of the ripening process, which facilitated the effective action of 1-MCP and ensured even ripeness of the fruit.

In this study, it was shown that the harvest date ($\eta^2 = 47.8\%$) and the shelf life period ($\eta^2 = 23.1\%$) played a key role in shaping the firmness of apples. Fruit harvested later and kept at room temperature showed a greater decrease in firmness, which is consistent with the observations of Thongkum et al. [56] regarding the effect of harvest maturity on the expression of ethylene genes. Additionally, a positive correlation was found between delayed harvest and increased ACC content, confirming the activation of the ethylene biosynthesis pathway as maturation progressed. The use of 1-MCP both before harvest (Harvista™) and after harvest (SmartFresh™), combined with the optimal harvest date, significantly supported the maintenance of apple firmness, which makes this strategy effective in the production of fruit intended for export to distant markets [26,57].

The storage period ($\eta^2 = 26.8\%$) and the harvest date ($\eta^2 = 26.6\%$) played an important role for TA, with prolonged storage and delayed harvest leading to a decrease in TA, which may adversely affect the taste of ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples, which are characterized by relatively low acidity [3,7]. Storage technology had a relatively small, although statistically proven, impact ($\eta^2 = 3.1\%$).

SSC was less dependent on the analyzed factors than firmness or acidity. The use of 1-MCP before harvest ($\eta^2 = 22.7\%$) and after harvest ($\eta^2 = 16.2\%$) had the strongest impact, with the pre-harvest treatment reducing SSC and the post-harvest treatment showing the opposite effect. These effects have not been clearly stated in the literature [31,58–62]. Storage period ($\eta^2 = 8.5\%$), harvest date ($\eta^2 = 9.3\%$), and shelf life period ($\eta^2 = 3.2\%$) had a moderate impact, suggesting that SSC is more dependent on agrotechnical and environmental factors.

The SSC/TA ratio, reflecting the taste balance of apples, was most strongly shaped by the storage period ($\eta^2 = 26.4\%$), the harvest date ($\eta^2 = 22.5\%$) and the shelf life period ($\eta^2 = 16.7\%$). On the other hand, the 1-MCP treatment after harvest lowered the ratio ($\eta^2 = 35.4\%$), mainly by maintaining higher acidity with relatively stable SSC. These effects are important in the context of export, where the taste balance of apples is a key factor affecting consumer acceptance [3,7,8].

Regarding ACC content, which is an indicator of the metabolic activity of apples, the application of 1-MCP after harvest turned out to be a key factor ($\eta^2 = 21.3\%$). The storage period ($\eta^2 = 14.4\%$) and shelf life period ($\eta^2 = 6.2\%$) also showed a significant impact. The number of days with an average air temperature below 15 °C within the last 30 (or 44) days before harvest had a marginal effect ($\eta^2 = 1.9\%$), and the use of 1-MCP before harvest did not significantly affect the ACC content ($\eta^2 = 0.0\%$; $p = 0.726$), which confirms previous observations on the possibility of regeneration of ethylene receptors [37,40].

Storage technology (ULO vs. DCA) showed a significant but only limited effect on ACC content ($\eta^2 = 4.9\%$). With respect to firmness and SSC, its effect was negligible ($\eta^2 = 0.0$ – 0.5%). These results suggest that in the studied seasons, atmospheric composition did not play a significant role in shaping the quality the ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples, which is in agreement with previous observations on seasonal variation in the effectiveness of DCA technology [22,36–38].

To summarize, the results of this study clearly indicate that the most effective strategy to maintain the high quality of stored ‘Gala Schniga® SchniCo Red(s)’ apples is the post-harvest application of 1-MCP, especially in combination with an optimal harvest date (typically 121–122 DAFB) and a controlled storage period and exposure under shelf life conditions. The stepwise regression analysis

in combination with the effect size assessment (η^2) showed a dominant role of post-harvest factors in shaping firmness, titration acidity, and ACC content, while factors such as storage technology or weather conditions in the final vegetation period had a marginal, although statistically proven, effect. The results underline the importance of an integrated approach combining chemical treatments with appropriate harvest planning and storage logistics, which can be the basis for the development of practical recommendations for producers and exporters and for the development of decision-making models to support the planning of storage processes, especially for cultivars intended for markets with high quality requirements.

5. Conclusions

The use of 1-MCP before apple harvest showed a relatively small effect in promoting the maintenance of higher flesh firmness and lowering SSC and the SSC/TA ratio. On the other hand, the post-harvest application of 1-MCP proved to be the most effective factor in maintaining the firmness of apples, reducing the production of ACC, and maintaining higher TA. This treatment contributed to a reduction in the SSC/TA ratio and supported a favorable balance between sweetness and acidity in the fruit, which is particularly important in demanding export markets.

Delayed harvest dates and extended shelf life—both in refrigerated conditions and during shelf life—increased SSC and SSC/TA value, while causing a significant decrease in firmness and acidity, which can negatively affect the sensory quality and shelf life of the fruit. The most beneficial results in maintaining the quality of ‘Gala Schniga[®] SchniCo Red(s)’ apples were obtained by combining an optimal harvest date with post-harvest application of 1-MCP and a shorter shelf life period.

The used controlled atmosphere technology (ULO vs. DCA) showed little effect on most of the quality parameters of apples, which indicates the possibility of flexible selection of storage conditions, especially with the simultaneous use of an ethylene inhibitor. The obtained results can be the basis for the development of practical recommendations for producers and exporters of apples intended for fresh consumption and can support decisions on the optimal harvest date, storage strategy, and the timing of ethylene receptor blocking, depending on the specifics and requirements of the target markets.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture15222363/s1>, Table S1: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S2: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S3: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S4: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S5: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S6: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S7: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S8: Flesh firmness (N) of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S9: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S10: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S11: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S12: ACC content

(nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S13: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S14: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions; Table S15: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions; Table S16: ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions.

Author Contributions: Conceptualization, M.M. and K.T.; methodology, M.M.; software, M.M.; validation, M.M.; formal analysis, M.M. and K.T.; investigation, M.M. and K.T.; resources, M.M. and K.T.; data curation, M.M. and K.T.; writing—original draft preparation, M.M. and K.T.; writing—review and editing, M.M. and K.T.; visualization, M.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data is contained within the article or Supplementary Material. The original contributions presented in this study are included in the article/Supplementary Material. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: The authors sincerely thank Paweł Jankowski (Department of Information Systems, Warsaw University of Life Sciences—SGGW) for his valuable statistical consultation.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. WAPA. World Apple and Pear Association Annual Report, 2021. Available online: <https://www.wapa-association.org/> (accessed on 26 October 2025).
2. WAPA. Prognosfruit 2025—EU Apple and Pear Crop Forecast. 2025. Available online: <https://agriexchange.apeda.gov.in/MarketReport/EUR0206202510415231189.pdf> (accessed on 26 October 2025).
3. Kraciński, P.; Stolarczyk, P.; Czerwińska, W.; Nosecka, B. Fruit Consumption Habits and Apple Preferences of University Students in Poland. *Foods* **2025**, *14*, 2073. [CrossRef]
4. Current Market Information, Summary of 2023—Production and Export in Europe. Available online: <https://applesfromeurope.eu/2024/02/29/current-market-information-summary-of-2023-production-and-export-in-europe/> (accessed on 26 October 2025).
5. Cliff, M.; Bejaei, M.; Stanich, K. Modelling and classification of apple textural attributes using sensory, instrumental and compositional analyses. *Foods* **2021**, *10*, 384. [CrossRef]
6. Mou, Y.; Yang, X.; Zhang, Y.; Qi, D.; Tian, L.; Huo, H.; Yin, C.; Liu, C.; Dong, X.; Xu, J.; et al. Identification and evaluation of flesh texture of crisp pear fruit based on penetration test using texture analyzer. *Horticulturae* **2025**, *11*, 359. [CrossRef]
7. Alston, F.; Lynn, J.; Tartarini, S.; Manganaris, A.; Schrevers, E.; Verhaegh, J.; Griffon, B.; Evans, K.; Maliepaard, C.; Durel, C.; et al. Quantitative genetic analysis and comparison of physical and sensory descriptors relating to fruit flesh firmness in apple (*Malus pumila* Mill.). *Theor. Appl. Genet.* **2000**, *100*, 1074–1084. [CrossRef]
8. Meike, R.; Dean, D.L.; Baird, T. Understanding Apple Attribute Preferences of US Consumers. *Foods* **2022**, *11*, 166. [CrossRef] [PubMed]
9. Al Shoffe, Y.; Rudell, D.; Park, D.; Algul, B.E.; Qin, M.; Shi, M.; Dando, R.; Watkins, C.B. Aroma volatiles and sensory quality of organically-grown apple cultivars after dynamic controlled atmosphere (DCA) storage and comparison with CA-stored fruit with and without 1-methylcyclopropene (1-MCP). *Postharvest Biol. Technol.* **2024**, *218*, 113162. [CrossRef]
10. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbuehl, B.; Casutt, M. Consumer demands on eating quality of apples: Minimum requirements on firmness, soluble solids and acidity. *Acta Hort.* **2003**, *600*, 693–696. [CrossRef]
11. Lysiak, G. The base colour of fruit as an indicator of optimum harvest date for two apple cultivars (*Malus domestica* Borkh.). *Folia Hort.* **2012**, *24*, 81–89. [CrossRef]

12. Alexander, L.; Grierson, D. Ethylene biosynthesis and action in tomato: A model for climacteric fruit ripening. *J. Exp. Bot.* **2002**, *53*, 2039–2055. [CrossRef] [PubMed]
13. Pirrello, J.; Liu, M.; Chervin, C.; Roustan, J.; Bouzayen, M. Ethylene control of fruit ripening: Revisiting the complex network of transcriptional regulation. *Plant Physiol.* **2015**, *169*, 2380–2390. [CrossRef]
14. Li, Z.; Liu, Y.; Gao, Y.; Chen, J.; Liu, M.; Bouzayen, M.; Su, D.; Tang, M. The molecular regulation of ethylene in fruit ripening. *Small Methods* **2020**, *4*, 1900485. [CrossRef]
15. Ramón, A.; José, P.; Santiago, L.; Ramiro, A. Strategies to delay ethylene-mediated ripening in climacteric fruits: Implications for shelf life extension and postharvest quality. *Horticulturae* **2024**, *10*, 840. [CrossRef]
16. Kassebi, S.; Korzenszky, P. Examination of weight loss and colour changes in Golden Delicious apples under light and dark storage conditions. *Prog. Agric. Eng. Sci.* **2024**, *20*, 199–215. [CrossRef]
17. Wang, Y.; Li, Y.; Feng, Y.; Hou, Z.; Xia, R.; Wang, Z.; Liu, N.; Pan, A.; Cong, X.; Qian, G.; et al. Light-based improvement technology for postharvest fruits and vegetables flavor and regulation mechanism: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2025**, *65*, 7010–7032. [CrossRef]
18. Thewes, F.R.; Brackmann, A.; Anese, R.O.; Ludwig, V.; Schultz, E.E.; dos Santos, L.F.; Wendt, I.M. Effect of Dynamic Controlled Atmosphere Monitored by Respiratory Quotient and 1-Methylcyclopropene on the Metabolism and Quality of ‘Galaxy’ Apple Harvested at Three Maturity Stages. *Food Chem.* **2017**, *222*, 84–93. [CrossRef]
19. Chen, L.; Pan, Y.; Jia, X.; Wang, X.; Yuan, J.; Li, X. Constant Storage Temperature Delays Firmness Decreasing and Pectin Solubilization of Apple during Post-Harvest Storage. *J. Food Process. Preserv.* **2021**, *45*, e15655. [CrossRef]
20. Prange, R.K.; Wright, A.H. A Review of Storage Temperature Recommendations for Apples and Pears. *Foods* **2023**, *12*, 466. [CrossRef]
21. Malachowska, M.; Tomala, K. Effect of preharvest and postharvest application of 1-MCP on the quality of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples during long-term storage. *Agriculture* **2022**, *12*, 2073. [CrossRef]
22. Malachowska, M.; Tomala, K. Apple quality during shelf-life after long-term storage and simulated transport. *Agriculture* **2023**, *13*, 2045. [CrossRef]
23. Sunny, A.; Nisha, R.; Ashitha, G. Effect of pre-harvest and post-harvest hexanal treatments on fruits and vegetables: A review. *Agric. Rev.* **2020**, *41*, 124–131. [CrossRef]
24. Nia, A.; Siahmansour, S.; Taghipour, S. Pre-harvest application of chitosan and postharvest Aloe vera gel coating enhances quality of table grape (*Vitis vinifera* L. cv. ‘Yaghouti’) during postharvest period. *Food Chem.* **2021**, *347*, 129012. [CrossRef]
25. Mditshwa, A.; Fawole, O.A.; Opara, U.L. Recent Developments on Dynamic Controlled Atmosphere Storage of Apples—A Review. *Food Packag. Shelf Life* **2018**, *16*, 59–68. [CrossRef]
26. Shin, J.; Park, H.; Song, J.; Lee, K.; Cho, T.; Kim, H.; Han, H. Advances in the strategic approaches of pre- and post-harvest treatment technologies for peach fruits (*Prunus persica*). *Horticulturae* **2023**, *9*, 315. [CrossRef]
27. Tomala, K.; Grzęda, M.; Guzek, D.; Głabska, D.; Gutkowska, K. The Effects of Preharvest 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment on the Fruit Quality Parameters of Cold-Stored ‘Szampion’ Cultivar Apples. *Agriculture* **2020**, *10*, 80. [CrossRef]
28. Wu, D.; Wei, Q.; Zheng, S.; Gu, Q.; Liu, X.; Chen, Z. Effect of pre-harvest calcium treatment on post-harvest fruit quality of Nanfeng tangerine. *Horticulturae* **2024**, *10*, 381. [CrossRef]
29. Vargens, F.; Aires, E.; Rodrigues, J.; Ono, E.; Marques, I.; Silva, D.; De Assis De Oliveira, E.; Júnior, F.; Santos, V. Effect of pre-harvest application of *Bacillus subtilis* on the shelf life of tomato fruits. *Sci. Hortic.* **2024**, *325*, 113516. [CrossRef]
30. Wang, W.; Ge, Y.; Bai, L.; Li, J.; Han, X.; Zhang, M.; Lv, J. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the expression of genes involved in the chlorophyll degradation pathway of apple fruit during storage. *Food Chem.* **2020**, *308*, 125707. [CrossRef] [PubMed]
31. Peng, Z.; Fu, D. Effects of 1-methylcyclopropene treatment on the quality of Red ‘Fuji’ apples fruit during short-time storage. *Food Qual. Saf.* **2022**, *6*, fyac074. [CrossRef]
32. Hunt, I.; Sidhu, R.; Bound, S.; Swarts, N. Impact of pre-harvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruit quality, physiological disorders and respiration rate of ‘Scilate’ apple. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **2024**; in press. [CrossRef]
33. Hoehn, F.; Guggenbühl, B.; Künsch, U.; Gasser, F. Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharvest Biol. Technol.* **2003**, *27*, 27–37. [CrossRef]
34. Juhnevcica-Radenkova, K.; Radenkova, V. Comparison of three storage techniques for post-harvest quality preservation of six commercially available cultivars of apple. *Int. J. Fruit Sci.* **2018**, *18*, 268–286. [CrossRef]
35. Remeniuk, L.; Melnyk, O.; Drozd, O. Storage ability and sensory quality of ‘Reinette Simirenko’ apples treated with ethephon and 1-MCP. *J. Hortic. Res.* **2025**, *33*, 29–38. [CrossRef]

36. Łysiak, G.P.; Kurlus, R.; Michalska, A. Increasing the frost resistance of 'Golden Delicious', 'Gala' and 'Sampion' apple cultivars. *Folia Hort.* **2016**, *28*, 125–135. [[CrossRef](#)]
37. Gasser, F.; Rebeaud, S. Fruit quality as affected by 1-MCP treatment and DCA storage—A comparison of the two methods. *Eur. J. Hort. Sci.* **2015**, *80*, 18–24. [[CrossRef](#)]
38. McCormick, R.; Kitemann, D. Effect of high temperature and 1-MCP application or dynamic controlled atmosphere on energy savings during apple storage. *Eur. J. Hort. Sci.* **2015**, *80*, 33–38. [[CrossRef](#)]
39. Köpcke, D. 1-Methylcyclopropene (1-MCP) and dynamic controlled atmosphere (DCA) applications under elevated storage temperatures: Effects on fruit quality of 'Elstar', 'Jonagold' and 'Gloster' apple (*Malus domestica* Borkh.). *Eur. J. Hort. Sci.* **2015**, *80*, 25–32. [[CrossRef](#)]
40. Lipa, T.; Szot, I.; Dobrzański, B., Jr.; Kaplan, M. The assessment of ten apple cultivars and their susceptibility on bruising after storage and shelf-life of fruit treated with 1-MCP. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2019**, *18*, 129–140.
41. Sutormina, A.; Nazarov, Y.; Gudkovsky, V.; Kozhina, L. Sustainability of apple fruits cv. Berkutovskoye to physiological diseases under different storage technologies. *E3S Web Conf.* **2021**, *254*, 02025. [[CrossRef](#)]
42. Lachapelle, M.; Bourgeois, G.; DeEll, J.R. Effects of Preharvest Weather Conditions on Firmness of 'McIntosh' Apples at Harvest Time. *HortScience* **2013**, *48*, 474–480. [[CrossRef](#)]
43. Buffer, G. Ethylene-promoted conversion of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid to ethylene in the peel of apple at various stages of fruit development. *Plant Physiol.* **1986**, *80*, 539–543.
44. Lizada, M.C.C.; Yang, S.F. A simple and sensitive assay for 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid. *Anal. Biochem.* **1979**, *100*, 140–145. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Jobling, J.; McGlasson, W.B.; Dilley, D.R. Induction of ethylene-synthesizing competency in Granny Smith apples by exposure to low temperature in air. *Postharvest Biol. Technol.* **1991**, *1*, 111–118. [[CrossRef](#)]
46. Kondo-Brown, K.; Fukuda, C. A separate track for advanced heritage language students? Japanese intersentential referencing. In *Teaching Chinese, Japanese, and Korean Heritage Language Students*; Kondo-Brown, K., Brown, J.D., Eds.; Lawrence Erlbaum Associates: New York, NY, USA, 2008.
47. Walter, H.; Lieth, H.; Rehder, H.; Harnickell, E. *Klimadiagramm-Weltatlas*; G. Fischer: Jena, Germany, 1960; p. 103.
48. Kuang, L.; Wang, Z.; Cheng, Y.; Li, H.; Li, J.; Shen, Y.; Zhang, J.; Xu, G. Cultivar and origin authentication of 'Fuji' and 'Gala' apples from two dominant origins of China based on quality attributes. *Food Chem. X* **2024**, *23*, 101643. [[CrossRef](#)]
49. McArtney, S.J.; Obermiller, J.D.; Schupp, J.R.; Parker, M.L.; Edgington, T.B. Preharvest 1-methylcyclopropene delays fruit maturity and reduces softening and superficial scald of apples during long-term storage. *HortScience* **2008**, *43*, 366–371. [[CrossRef](#)]
50. Satekge, T.K.; Magwaza, L.S. Postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on climacteric fruits: Factors affecting efficacy. *Int. J. Fruit Sci.* **2022**, *22*, 595–607. [[CrossRef](#)]
51. Doerflinger, F.C.; Al Shoffe, Y.; Sutanto, G.; Nock, J.F.; Watkins, C.B. Preharvest 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment effects on quality of spot and strip picked 'Gala' apples at harvest and after storage as affected by postharvest 1-MCP and temperature conditioning treatments. *Sci. Hort.* **2024**, *325*, 112682. [[CrossRef](#)]
52. Bui, T.; Stridh, H.; Molin, M. Influence of weather conditions on the quality of 'Ingrid Marie' apples and their susceptibility to grey mould infection. *J. Agric. Food Res.* **2021**, *4*, 100104. [[CrossRef](#)]
53. Sharma, M.; Negi, S.; Kumar, P.; Srivastava, D.; Choudhary, M.; Irfan, M. Fruit ripening under heat stress: The intriguing role of ethylene-mediated signaling. *Plant Sci.* **2023**, *335*, 111820. [[CrossRef](#)]
54. Honda, C.; Bessho, H.; Murai, M.; Iwanami, H.; Moriya, S.; Abe, K.; Wada, M.; Moriya-Tanaka, Y.; Hayama, H.; Tatsuki, M. Effect of Temperature on Anthocyanin Synthesis and Ethylene Production in the Fruit of Early- and Medium-maturing Apple Cultivars during Ripening Stages. *HortScience* **2014**, *49*, 1510–1517. [[CrossRef](#)]
55. Paull, R.; Chen, N. Heat treatment and fruit ripening. *Postharvest Biol. Technol.* **2000**, *21*, 21–37. [[CrossRef](#)]
56. Thongkum, M.; McAtee, P.M.; Schaffer, R.J.; Allan, A.C.; Ketsa, S. Characterization and differential expression of ethylene receptor genes during fruit development and dehiscence of durian (*Durio zibethinus*). *Sci. Hort.* **2018**, *240*, 623–630. [[CrossRef](#)]
57. Péneau, S.; Hoehn, E.; Roth, H.-R.; Escher, F.; Nuessli, J. Importance and consumer perception of freshness of apples. *Food Qual. Prefer.* **2006**, *17*, 9–19. [[CrossRef](#)]
58. Błaszczyk, J.; Gasparski, K. Influence of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the quality and storability of 'Red Jonaprince' apples stored in different conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2019**, *18*, 7–15. [[CrossRef](#)]
59. Jiang, Y.; Li, W.; Wang, H.; Du, J.; Zhang, Y.; Li, D.; Wang, J.; Zhou, Q.; Pang, L.; Tang, Y. 1-MCP delays ripening and maintains postharvest quality of nectarines by regulating transcriptional and metabolic responses. *Sci. Hort.* **2024**, *330*, 113083. [[CrossRef](#)]
60. Liu, J.; Islam, M.T.; Sherif, S.M. Effects of Aminoethoxyvinylglycine (AVG) and 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on the Pre-Harvest Drop Rate, Fruit Quality, and Stem-End Splitting in 'Gala' Apples. *Horticulturae* **2022**, *8*, 1100. [[CrossRef](#)]

61. Tipu, M.M.H.; Sherif, S.M. Ethylene and its Crosstalk with Hormonal Pathways in Fruit Ripening: Mechanisms, Modulation, and Commercial Exploitation. *Front. Plant Sci.* **2024**, *15*, 1475496. [CrossRef]
62. Tipu, M.M.H.; Jahed, K.R.; Sherif, S.M. Integrated Application of ACC and AVG Mitigates Pre-Harvest Fruit Drop and Enhances Red Coloration in Apple. *Plant Growth Regul.* **2025**, *105*, 1289–1305. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Table S1. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 63.9 a	A 72.6 b	A 73.1 b	A 74.5 b
27.09.2022 – DH	B 58.5 a	B 69.6 b	B 70.0 b	A 70.7 b
Effect of delayed harvest date	-5.4*	-3.0 ns	-3.1 ns	-3.8*
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 64.4 a	A 75.9 b	B 78.9 b	B 80.4 b
27.09.2022 – DH	A 52.6 a	B 71.1 b	B 70.9 b	A 73.6 b
Effect of delayed harvest date	-11.8**	-4.8*	-8.0**	-6.8*
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 55.6 a	A 72.9 b	A 71.9 b	AB 76.4 b
27.09.2022 – DH	A 51.4 a	A 65.0 b	A 65.1 b	A 72.0 c
Effect of delayed harvest date	-4.2*	-7.9**	-6.8*	-4.4*

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S2. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	AB 53.0 a	A 67.8 b	A 70.0 bc	A 73.1 c
27.09.2022 – DH	A 43.3 a	B 55.2 b	A 64.6 c	A 67.2 c
Effect of delayed harvest date	-9.7**	-12.6**	-5.4*	-5.9*
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 57.0 a	B 77.8 b	B 77.1 b	B 79.3 b
27.09.2022 – DH	A 48.0 a	B 54.5 b	B 70.3 c	B 73.1 c
Effect of delayed harvest date	-9.0**	-23.3**	-6.8*	-6.2*
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 48.6 a	A 66.2 b	A 71.8 c	AB 77.2 d
27.09.2022 – DH	A 44.2 a	A 46.5 a	A 63.1 b	B 71.9 c
Effect of delayed harvest date	-4.4*	-19.7**	-8.7**	-5.3*

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S3. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	AB 65.8 a	A 71.9 b	A 73.5 bc	A 77.9 c
27.09.2022 – DH	A 57.4 a	A 66.1 b	A 69.8 b	A 65.2 b
Effect of delayed harvest date	-8.5**	-5.8*	-3.7*	-12.7**
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 70.3 a	A 72.3 a	A 75.2 ab	A 79.9 b
27.09.2022 – DH	A 53.8 a	A 64.4 b	A 70.0 c	AB 69.7 c
Effect of delayed harvest date	-16.5**	-7.9**	-5.2*	-10.2**
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 64.9 a	A 71.6 b	A 74.1 b	A 76.5 b
27.09.2022 – DH	A 52.9 a	A 63.4 b	A 70.0 c	B 72.8 c
Effect of delayed harvest date	-12.0**	-8.2**	-4.1*	-3.7*

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S4. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 58.9 a	A 68.5 b	A 70.6 b	A 72.7 b
27.09.2022 – DH	A 46.6 a	B 57.0 b	A 63.6 c	A 68.0 c
Effect of delayed harvest date	-12.3**	-11.5**	-7.0**	-4.7*
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 61.2 a	B 73.2 b	A 74.5 bc	B 78.2 c
27.09.2022 – DH	A 47.2 a	A 52.5 b	A 67.9 c	B 72.8 d
Effect of delayed harvest date	-14.0**	-20.7**	-6.6*	-5.4*
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 53.9 a	A 64.7 b	A 73.6 c	AB 75.1 c
27.09.2022 – DH	A 44.4 a	A 48.3 a	A 66.6 b	AB 69.4 b
Effect of delayed harvest date	-9.5**	-16.4**	-7.0**	-5.7*

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S5. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 51.0 a	B 57.6 b	A 67.4 c	B 73.6 c
26.09.2023 – DH	A 47.4 a	B 47.7 a	A 60.4 b	B 58.8 b
Effect of delayed harvest date	-3.6 ns	-9.9**	-7.0*	-14.8**
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 49.3 a	AB 56.1 b	A 66.7 c	AB 69.8 c
26.09.2023 – DH	A 44.8 a	A 42.5 a	A 57.5 b	AB 56.7 b
Effect of delayed harvest date	-4.5*	-13.6**	-9.2**	-13.1**
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 46.2 a	A 52.4 b	A 63.4 c	A 68.5 c
26.09.2023 – DH	A 43.4 a	A 41.0 a	A 56.8 b	A 53.5 b
Effect of delayed harvest date	-2.8 ns	-11.4**	-6.6*	-15.0**

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S6. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 42.2 a	A 45.6 a	A 62.9 b	B 71.4 c
26.09.2023 – DH	A 41.0 a	A 37.5 a	AB 55.6 b	B 57.8 b
Effect of delayed harvest date	-1.2 ns	-8.1**	-7.3**	-13.6**
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 41.6 a	A 47.3 b	A 63.2 c	AB 68.6 d
26.09.2023 – DH	A 38.9 a	A 36.7 a	B 58.3 c	A 51.6 b
Effect of delayed harvest date	-2.7 ns	-10.6**	-4.9*	-17.0**
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 42.2 a	A 45.7 a	A 62.7 b	A 66.7 b
26.09.2023 – DH	A 37.0 a	A 35.9 a	A 54.1 b	A 52.7 b
Effect of delayed harvest date	-5.2*	-9.8**	-8.6**	-14.0**

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S7. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	B 54.8 a	B 59.7 a	A 70.6 b	A 74.0 b
26.09.2023 – DH	A 46.3 a	A 44.0 a	A 59.7 b	A 58.5 b
Effect of delayed harvest date	-8.5*	-15.7**	-10.9**	-15.5**
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	AB 51.3 a	A 52.7 a	A 68.4 b	A 69.8 b
26.09.2023 – DH	A 43.9 a	A 41.1 a	A 58.1 b	A 58.0 b
Effect of delayed harvest date	-7.4*	-11.6**	-10.3**	-11.8**
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 46.2 a	A 51.3 a	A 66.5 b	A 69.7 b
26.09.2023 – DH	A 40.8 a	A 39.3 a	A 56.4 b	A 54.6 b
Effect of delayed harvest date	-5.4*	-12.0**	-10.1**	-15.1**

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S8. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 44.8 a	B 49.1 a	A 63.5 b	B 73.5 c
26.09.2023 – DH	A 38.7 a	A 37.3 a	A 51.2 b	B 56.2 b
Effect of delayed harvest date	-6.1*	-11.8**	-12.3**	-17.3**
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 42.0 a	A 41.4 a	A 65.8 b	A 64.9 b
26.09.2023 – DH	A 36.9 a	A 35.8 a	A 54.5 b	B 55.8 b
Effect of delayed harvest date	-5.1 ns	-5.6*	-11.3**	-9.1*
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 40.2 a	AB 44.3 a	A 62.4 b	AB 68.6 b
26.09.2023 – DH	A 35.5 a	A 34.9 a	A 51.2 b	A 49.1 b
Effect of delayed harvest date	-4.7 ns	-9.4*	-11.2**	-19.5**

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S9. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 0.036 a	A 0.043 a	A 0.012 a	A 0.022 a
27.09.2022 – DH	A 0.151 a	A 0.064 a	A 0.072 a	A 0.088 a
Effect of delayed harvest date	0.115*	0.021 ns	0.060 ns	0.066*
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	AB 0.088 a	A 0.053 a	A 0.043 a	A 0.054 a
27.09.2022 – DH	A 0.168 a	A 0.125 a	A 0.096 a	A 0.085 a
Effect of delayed harvest date	0.080*	0.072 ns	0.053 ns	0.031 ns
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 0.161 a	B 0.196 a	A 0.100 a	B 0.185 a
27.09.2022 – DH	A 0.193 a	B 0.258 a	B 0.287 a	B 0.257 a
Effect of delayed harvest date	0.032 ns	0.054 ns	0.187**	0.072 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S10. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 0.084 a	A 0.044 a	A 0.035 a	A 0.026 a
27.09.2022 – DH	A 0.088 a	A 0.083 a	A 0.093 a	A 0.034 a
Effect of delayed harvest date	0.004 ns	0.039 ns	0.058 ns	0.008 ns
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	AB 0.226 a	A 0.126 a	A 0.086 a	A 0.080 a
27.09.2022 – DH	AB 0.230 a	A 0.172 a	A 0.087 a	A 0.162 a
Effect of delayed harvest date	0.004 ns	0.046 ns	0.001 ns	0.082 ns
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 0.284 b	B 0.587 c	A 0.070 a	A 0.101 a
27.09.2022 – DH	B 0.311 ab	B 0.499 b	B 0.361 b	A 0.173 a
Effect of delayed harvest date	0.027 ns	-0.088 ns	0.291**	0.072 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S11. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 0.078 a	A 0.076 a	A 0.016 a	A 0.011 a
27.09.2022 – DH	A 0.117 a	A 0.106 a	A 0.121 a	A 0.050 a
Effect of delayed harvest date	0.039 ns	0.030 ns	0.105 ns	0.039 ns
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 0.078 a	A 0.192 a	A 0.029 a	AB 0.165 a
27.09.2022 – DH	A 0.208 a	A 0.193 a	A 0.147 a	A 0.140 a
Effect of delayed harvest date	0.130 ns	0.001 ns	0.118 ns	-0.025 ns
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 0.376 b	B 0.626 c	A 0.158 a	B 0.208 ab
27.09.2022 – DH	B 0.411 bc	B 0.543 c	B 0.338 b	A 0.130 a
Effect of delayed harvest date	0.035 ns	-0.083 ns	0.180*	-0.078 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S12. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	A 0.127 a	A 0.017 a	A 0.018 a	A 0.065 a
27.09.2022 – DH	A 0.027 a	A 0.057 a	A 0.024 a	A 0.079 a
Effect of delayed harvest date	-0.100 ns	0.040 ns	0.006 ns	0.014 ns
After 7 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	B 0.322 b	B 0.356 b	AB 0.123 a	A 0.097 a
27.09.2022 – DH	B 0.341 b	A 0.173 ab	A 0.086 a	A 0.070 a
Effect of delayed harvest date	0.019 ns	-0.183*	-0.037 ns	-0.027 ns
After 9 Months of Storage				
13.09.2022 – OHD	C 0.714 c	B 0.416 b	B 0.274 ab	A 0.200 a
27.09.2022 – DH	C 0.586 b	B 0.520 b	B 0.277 a	A 0.151 a
Effect of delayed harvest date	-0.125 ns	0.104 ns	0.003 ns	-0.049 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S13. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.140 a	A 0.119 a	A 0.055 a	A 0.072 a
26.09.2023 – DH	B 0.234 b	A 0.163 b	AB 0.066 a	A 0.164 b
Effect of delayed harvest date	0.094*	0.044 ns	0.011 ns	0.092*
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.113 ab	A 0.148 b	A 0.050 a	A 0.046 a
26.09.2023 – DH	A 0.131 a	AB 0.248 b	A 0.048 a	A 0.082 a
Effect of delayed harvest date	0.018 ns	0.100*	-0.002 ns	0.036 ns
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.125 a	A 0.103 a	A 0.052 a	A 0.052 a
26.09.2023 – DH	B 0.233 b	B 0.278 b	B 0.138 ab	A 0.112 a
Effect of delayed harvest date	0.108*	0.175**	0.086*	0.060 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S14. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under ULO conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.214 ab	A 0.308 b	A 0.073 a	A 0.091 a
26.09.2023 – DH	A 0.411 b	A 0.313 b	A 0.095 a	A 0.092 a
Effect of delayed harvest date	0.197*	0.005 ns	0.022 ns	0.001 ns
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.160 ab	A 0.263 b	A 0.050 a	A 0.106 ab
26.09.2023 – DH	A 0.261 a	B 0.553 b	A 0.114 a	A 0.101 a
Effect of delayed harvest date	0.101 ns	0.290**	0.064 ns	-0.005 ns
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.259 b	A 0.193 ab	A 0.065 a	A 0.043 a
26.09.2023 – DH	A 0.298 b	B 0.503 c	A 0.078 a	A 0.088 a
Effect of delayed harvest date	0.039 ns	0.031 ns	0.013 ns	0.045 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S15. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after storage, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.158 a	A 0.082 a	A 0.141 a	A 0.098 a
26.09.2023 – DH	B 0.460 b	A 0.251 ab	AB 0.157 a	A 0.169 a
Effect of delayed harvest date	0.302*	0.169 ns	0.016 ns	0.071 ns
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.189 a	A 0.124 a	A 0.132 a	A 0.129 a
26.09.2023 – DH	AB 0.239 a	A 0.277 a	B 0.329 a	A 0.094 a
Effect of delayed harvest date	0.050 ns	0.153 ns	0.197*	-0.035 ns
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.223 a	A 0.142 a	A 0.129 a	A 0.089 a
26.09.2023 – DH	A 0.195 a	A 0.267 a	A 0.023 a	A 0.039 a
Effect of delayed harvest date	-0.028 ns	0.125 ns	-0.106 ns	-0.050 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Table S16. ACC content (nmol·kg⁻¹) in Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples directly after shelf-life, depending on the use of 1-MCP treatment, harvest date, and length of storage under DCA conditions

Date of harvest	Treatment applied			
	Control	Harvista™	SmartFresh™	Harvista™ + SmartFresh™
After 5 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	A 0.258 a	A 0.211 a	A 0.068 a	AB 0.165 a
26.09.2023 – DH	B 0.426 a	A 0.243 a	A 0.224 a	AB 0.204 a
Effect of delayed harvest date	0.168 ns	0.032 ns	0.156 ns	0.039 ns
After 7 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	B 0.532 b	A 0.353 b	A 0.108 ab	A 0.065 a
26.09.2023 – DH	B 0.513 b	B 0.546 b	A 0.157 a	A 0.076 a
Effect of delayed harvest date	-0.019 ns	0.193 ns	0.049 ns	0.011 ns
After 9 Months of Storage				
12.09.2023 – OHD	AB 0.397 b	A 0.385 b	A 0.110 a	B 0.395 b
26.09.2023 – DH	A 0.291 a	AB 0.449 a	A 0.222 a	B 0.334 a
Effect of delayed harvest date	-0.106 ns	0.064 ns	0.112 ns	-0.061 ns

Explanation: averages marked with the same small letter in the row and the same capital letter in the same color in the column do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; * – effect proven at $\alpha = 0.05$, ** – effect proven at $\alpha = 0.01$, ns – effect not statistically significant. OHD – optimal harvest date; DH – delayed harvest; ™ – trademark.

Warszawa, dn. 25.02.2026 r.

Mgr inż. Maria Małachowska

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa

Instytut Nauk Ogrodniczych

maria_małachowska@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo

Szkoły Głównej Gospodarstwa

Wiejskiego w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Małachowska M., Tomala K. **Determinants of postharvest quality in ‘Gala Schniga’[®] SchniCo Red(s)’ apples: The role of harvest date, storage duration, and 1-MCP application.** Agriculture, 2025; 15 (22), 2363

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu metodologii badań, przygotowaniu i wykorzystaniu oprogramowania oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzeniu walidacji, przygotowaniu wizualizacji wyników, a także na wykonaniu analizy formalnej, realizacji badań, zapewnieniu zasobów niezbędnych do przeprowadzenia eksperymentu, opracowaniu i porządkowaniu danych oraz przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu i udziale w jego późniejszej redakcji i korektach, co stanowi **75%** pracy.

Podpis


.....

Warszawa, dn. 25.02.2026 r.

Prof. dr hab., dr h.c. Kazimierz Tomala
Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa
Instytut Nauk Ogrodniczych
kazimierz_tomala@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Małachowska M., Tomala K. **Determinants of postharvest quality in 'Gala Schniga'® SchniCo Red(s)' apples: The role of harvest date, storage duration, and 1-MCP application.** Agriculture, 2025; 15 (22), 2363

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu analizy formalnej, realizacji badań, zapewnieniu zasobów niezbędnych do przeprowadzenia eksperymentu, opracowaniu i porządkowaniu danych oraz przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu, a także udziale w jego późniejszej redakcji i korektach, co stanowi **25%** pracy.

Podpis



.....

Article

Apple Quality during Shelf-Life after Long-Term Storage and Simulated Transport

Maria Małachowska *  and Kazimierz Tomala 

Department of Pomology and Horticulture Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS), ul. Nowoursynowska 159C, 02-787 Warsaw, Poland

* Correspondence: maria_malachowska@sggw.edu.pl; Tel.: +48-22-593-2080

Abstract: With the high production of apples in Poland, the priority actions include increasing their export volume. The main objective of the presented research was to maintain sufficient firmness in the apple cultivar Gala Schniga® SchniCo Red(s) transported to distant markets immediately after harvest or after long-term storage under ULO conditions (1.2% CO₂ and 1.2% O₂). In the study conducted during the 2021/2022 storage season on apples from the experimental orchard of the Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS; Warsaw-52°14' N, 21°1' E), the effect of the pre- and post-harvest application of 1-MCP, harvest date, and simulated transport duration on the quality of apples in target retail trading conditions was evaluated. Apples collected on a given harvest date were divided into four samples: control (without the use of 1-MCP), Harvista™-sprayed, SmartFresh™-treated, and Harvista™-sprayed + SmartFresh™-treated. Immediately after harvest and after 9 months of storage, the apples were packed in boxes and stored at 1 °C for 6 and 8 weeks (simulated transport conditions). Directly after the simulated transport and after an additional 7 and 14 days at 25 °C (handling conditions in hot countries), the following parameters were determined: firmness, SSC, TA, and ethylene production. The study noted a significant effect of the use of 1-MCP, harvest time, and simulated transport period on all tested parameters. Apples from trees sprayed with Harvista™ maintained a firmness of >55 N for 14 days of shelf-life only if they were harvested at the optimal date and transported immediately after harvest, and if their shipping lasted 6 weeks. Such firmness could be preserved after 8 weeks of the transport of SmartFresh™-treated apples harvested at the optimal date, and of Harvista™-sprayed + SmartFresh™-treated apples harvested at a delayed date. In the latter combination, apples also maintained the desired firmness after 9 months of storage + 6 weeks of transport regardless of the harvest date.

Keywords: apples; 'Gala'; Harvista™; SmartFresh™; ethylene; firmness; SSC; TA



Citation: Małachowska, M.; Tomala, K. Apple Quality during Shelf-Life after Long-Term Storage and Simulated Transport. *Agriculture* **2023**, *13*, 2045. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112045>

Academic Editor: Grzegorz Lysiak

Received: 14 September 2023

Revised: 21 October 2023

Accepted: 23 October 2023

Published: 24 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

According to WAPA (the World Apple and Pear Association), Poland is the largest producer of apples in Europe and the third largest producer of apples in the world, after China and the USA. Poland's domestic apple production is growing [1], whereas domestic consumption is decreasing [2]. Therefore, it is crucial for Polish apple growers to acquire new markets and at the same time offer apple cultivars that meet high consumer requirements. Such requirements include, notably, flesh firmness. This is because consumers dislike the mealiness of overripe apples that results from the loss of firmness [3]. In the case of hard cultivars, such as 'Gala', consumers prefer apples with a firmness above 55 N [4]. Maintaining sufficiently high firmness is a big challenge, especially since apples must meet high market requirements after long-term storage and long-distance transport.

Apples are a climacteric fruit whose ripening process is regulated by ethylene [5]. Their maturation involves a significant increase in the production of ethylene [6–8] as well as physiological and biochemical changes, including, among other things, a change in skin base color, a decrease in flesh firmness, the production of aromatic compounds, and a

change in fruit taste [9,10]. As ripening progresses, the shelf-life of apples becomes shorter, and thus their commercial value decreases. For this reason, it is important to know the level of ripeness of the fruit both at harvest and during storage [11].

It is very important to harvest apples in the right physiological stage because the harvest date has a key impact on their storage [12]. Apples harvested just after the start of climacteric ethylene production are characterized by the highest storage capacity [13]. Apples harvested too early lack the blush color typical of a given cultivar, and their taste does not fit into the preferences of consumers [14]. On the other hand, a too-late harvest results in faster firmness loss and greater susceptibility to watercore, internal breakdown, and bitter rot [15–17].

Maintaining sufficiently high quality in apples after long-term storage and long-distance transport is easier if the fruit is harvested at the optimal harvest date. However, this is not always possible due to factors independent of the fruit grower, such as unfavorable weather conditions (rainfall) or an insufficient number of seasonal workers. In such a case, special pre- and/or post-harvest treatments should be considered as a means to preserve the high quality of the fruit [18].

A popular method to achieve this is through the use of 1-methylcyclopropene (1-MCP), an inhibitor of ethylene synthesis with a 10-fold greater affinity for ethylene receptors than that of ethylene itself [19]. Available research results showing the effect of the post-harvest use of 1-MCP to reduce the ripening rate of apples transported to distant markets generally concern fruit harvested at the optimal harvest date and stored for only 5 months [20,21]. On the other hand, although studies on the pre-harvest use of 1-MCP do evaluate the fruit harvested both at the optimal and a delayed harvest date, they do not take into account the very long storage of apples prior to their shipment to a distant recipient [18,22].

Therefore, the objective of the experiment described in this paper was to determine the effect of the pre- and post-harvest application of 1-MCP on changes in the quality of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples collected at two harvest dates. In this study, special attention was paid to determining how the 1-MCP application, storage under ultra-low oxygen conditions (ULO; 1.2% CO₂ and 1.2% O₂), and length of transport affect the possibility to maintain apple firmness at above 55 N during a shelf-life of 7 and 14 days on a distant market.

2. Materials and Methods

2.1. Research Plan

The research was conducted in the 2021/2022 storage season on apples from the experimental orchard of the Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS; Warsaw—52°14' N, 21°1' E). Some of the Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples (from trees planted in 2014 on M.9 rootstock) collected at two harvest dates, 9 September 2021—the optimal harvest date (OHD) and 23 September 2021—delayed harvest (DH), were also studied in another experiment, the results of which have already been published [18]. In this cited paper, it is stated that 'Gala' apples for long-term storage should be harvested with a starch test value between 4 and 6 and a Streif index value between 0.20 and 0.14. It should be noted that weather conditions during the growing season in 2021 differed substantially compared to the long-term data (Table S1). Precipitation from April to June was close to the long-term averages, while July and August were very wet. Temperatures in April, May, and September were lower than the long-term average, while June and July were hot. For the purpose of the experiment described in this paper, 16 boxes of apples (15 kg per box) from both unsprayed and sprayed trees (7 days before OHD; Harvista[™]; AgroFresh Solutions Inc., Philadelphia, PA, USA; 150 g·ha⁻¹) were collected at the two above-mentioned harvest dates. After 7 days, half of the fruit from both unsprayed and sprayed trees (8 boxes per harvest date) was treated with 1-MCP (SmartFresh ProTabs, AgroFresh[™] Solutions Inc., Philadelphia, PA, USA; 0.65 (μL·L⁻¹) for 24 h.

The experiment was designed in the same way as described in the previously published paper [18]. It involved the following eight treatments:

1. Control—OHD (fruit harvested at the optimal harvest date, not treated with 1-MCP either before or after harvest);
2. Harvista™—OHD (fruit harvested from Harvista™-sprayed trees at the optimal harvest date);
3. SmartFresh™—OHD (fruit harvested from Harvista™-non-sprayed trees at the optimal harvest date, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest);
4. Harvista™ + SmartFresh™—OHD (fruit harvested from Harvista™-sprayed trees at the optimal harvest date, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest);
5. Control—DH (fruit harvested at the delayed harvest date, not treated with 1-MCP either before or after harvest);
6. Harvista™—DH (fruit harvested from Harvista™-sprayed trees at the delayed harvest date);
7. SmartFresh™—DH (fruit harvested from Harvista™-non-sprayed trees at the delayed harvest date, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest);
8. Harvista™ + SmartFresh™—DH (fruit harvested from Harvista™-sprayed trees at the delayed harvest date, and treated with SmartFresh™ 7 days after harvest).

After the post-harvest application of 1-MCP (SmartFresh™), the apples were split; half of the fruit from each treatment (4 boxes each) was placed under conditions that are present during long-distance transport, while the remaining fruit was stored for 9 months in ULO conditions (1.2% CO₂ and 1.2% O₂) at 1 °C and relative humidity of about 95%.

Directly after harvest and after 9 months of storage, the fruit was packed in a box (telescopic cardboard box closed from above) and kept for 6 and 8 weeks at 1 °C and in a normal atmosphere (78% N₂; 21% O₂; 0.05% CO₂).

The quality of apples after simulated transport was assessed three times: (1) immediately after 6 and 8 weeks, (2) after 7 days, and (3) after 14 days of keeping the apples in the conditions prevailing in trade in hot countries (temperature 25 °C, normal atmosphere). All measurements were made in 4 repetitions of 10 fruit per repetition. In the experiment, fruit of a typical size for the 'Gala' cultivar were used (140–150 g), which were grown under integrated fruit production methods.

2.2. Measurements

The procedure for measuring ethylene concentration in seed chambers was described in the previous paper [18]. A puncture was made with a syringe into the seed chamber of each fruit to draw 1 mL of air. Then, the ethylene concentration in the seed chamber was determined using a gas chromatograph (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA). The results are expressed in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$.

The starch test was performed by spraying the transversely cut apples with Lugol liquid (solution I₂ in KI). The obtained pattern of starch disintegration in the flesh was compared with that in the standard table and scored from 1 to 10. The final result was the average of each repetition [20].

Flesh firmness was determined in accordance with the description given in the work of Tomala et al. [22]. The value of this characteristic was measured using the metal stem (diameter 11 mm) of the penetrometer (Instron 5542, Instron, Norwood, MA, USA), on two opposite sides of the fruit, after removing the skin. The results were expressed in Newtons (N). The results of the measurement of firmness, starch distribution, and SSC at harvest were used to calculate the Streif index, which is considered a good indicator of fruit ripeness [23,24].

Titrate acidity (TA) was measured using an automated titrator (TitroLine 5000, Xylem Analytics Germany GmbH, Weilheim, Germany). For this purpose, juice was extracted using a juicer (one section of flesh was taken along with the skin of each fruit). Then, 100 mL of distilled water and 10 mL of apple juice were placed in 150 mL flasks. The obtained solution was titrated with 0.1 M NaOH to achieve a pH of 8.1. The results were expressed as a percentage of malic acid (%).

For the determination of the soluble solids content (SSC), the remaining juice prepared for TA measurements was used. The SSC in the juice was determined using a refractometer (Atago, Palette PR-32, Atago, Co., Ltd., Tokyo, Japan). Results are expressed in Brix degrees ($^{\circ}\text{Bx}$).

The intensity of ethylene production was recorded for 14 days at 25 $^{\circ}\text{C}$. Individual fruit were weighed and closed in jars with a capacity of 1500 mL. After an hour, 1 mL of air was taken from a jar and injected into a gas chromatograph (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA). Measurements were made for 6 apples from the combination, and the results were expressed in $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

2.3. Statistical Analysis

The Shapiro–Wilk test was used to verify the normal distribution of the results of individual parameters. The statistics were developed using a one-way analysis of variance, ANOVA, with Tukey’s post hoc test. The effects of the experimental variables, i.e., harvest date (optimal and delayed harvest date), pre- and post-harvest treatment of fruit with 1-MCP (Control, HarvistaTM, SmartFreshTM, and HarvistaTM + SmartFreshTM), and shelf-life (0, 7 and 14 days) on the physicochemical properties of apples were analyzed using multivariate analysis of variance – ANOVA, (Tables S2 and S3). Differences between means were assumed to be significant at $p \leq 0.05$. Statistical analyses were conducted using Statistica 13.3 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA).

3. Results

The physiological condition of apples at harvest is shown in Table 1. The same data were published by Małachowska and Tomala [18]. It should be emphasized that apples harvested at the delayed harvest date (DH) had a lower firmness, acidity (TA) and Streif index value, while they contained more extract (SSC) and had a higher starch index value. Nevertheless, the ethylene concentration in the seed chambers of apples from HarvistaTM trees remained below 0.5 ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$).

Table 1. Physiological condition of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples at optimal harvest date and delayed harvest.

Maturity Indices	Optimal Harvest Date (Harvest I)		Delayed Harvest (Harvest II)	
	Control	Harvista TM	Control	Harvista TM
	Mean \pm SD			
Internal ethylene content ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.18 \pm 0.17	0.48 \pm 0.19	1.23 \pm 0.64	0.42 \pm 0.12
Starch index (-)	3.3 \pm 0.3	4.1 \pm 1.0 ¹	9.0 \pm 0.4	6.8 \pm 1.2
Soluble solids content ($^{\circ}\text{Bx}$)	11.8 \pm 0.2	10.8 \pm 0.2	13.1 \pm 0.3	11.5 \pm 0.4
Firmness (N)	85.1 \pm 1.8	85.3 \pm 1.0	70.6 \pm 3.7	75.9 \pm 2.2
Titrateable acidity (%)	0.409 \pm 0.029	0.375 \pm 0.032	0.333 \pm 0.018	0.350 \pm 0.015
Streif Index (IS) (-)	0.22 \pm 0.02	0.20 \pm 0.04	0.06 \pm 0.01	0.10 \pm 0.02

¹ No normal distribution (verified using Shapiro–Wilk test: $p \leq 0.05$). TM—trademark.

3.1. Ethylene Production

The intensity of ethylene production after 6 weeks of simulated transport immediately following the harvest is shown in Figure 1. The spraying of trees with HarvistaTM together with post-harvest treatment of apples with SmartFreshTM ensured very low ethylene production up to day 6 at 25 $^{\circ}\text{C}$, regardless of the harvest date. At that time, similarly low ethylene production was found in apples treated with SmartFreshTM, but only in those collected at the optimal harvest date (OHD). On the other hand, apples from both control and HarvistaTM-sprayed trees were characterized by similarly high ethylene production, regardless of harvest date. In these combinations, ethylene production usually gradually decreased over time, whereas the opposite relationship was noted for apples treated with SmartFreshTM, regardless of whether or not the trees had previously been sprayed with HarvistaTM and regardless of the harvest date.

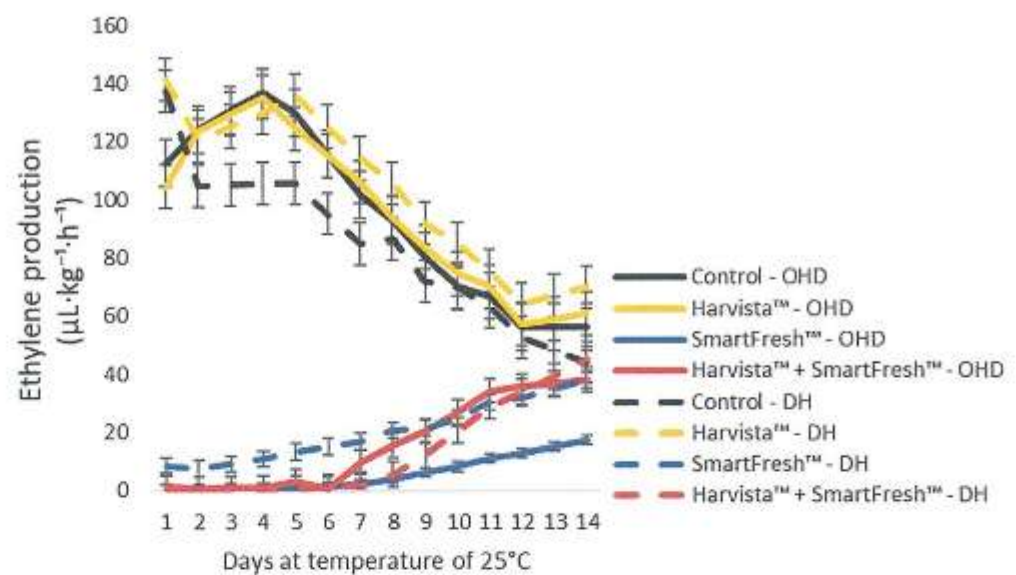


Figure 1. Ethylene production by Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples kept at 25 °C after 6 weeks of simulated transport directly after harvest; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; \pm , standard deviation; $n = 48$.

The curves illustrating the intensity of ethylene production after 8 weeks of transport were usually similar to the relationships recorded after 6 weeks (Figure 2). Interestingly, the extension of the transport period by 2 weeks resulted in a clear increase in ethylene production, especially in the first days on the target market at 25 °C, but only in the fruit treated with SmartFresh™, regardless of whether or not the trees had previously been sprayed with Harvista™ and regardless of the harvest date. As a rule, apples harvested at the delayed harvest date produced ethylene more intensively than did those harvested at the OHD.

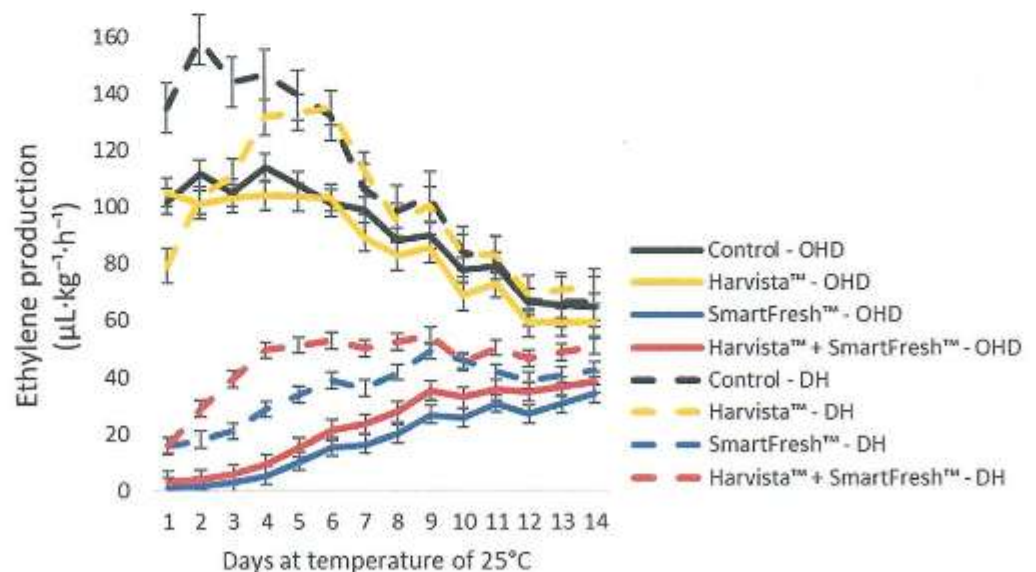


Figure 2. Ethylene production by Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples kept at 25 °C after 8 weeks of simulated transport directly after harvest; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; \pm , standard deviation; $n = 48$.

After 9 months of storage, apples from the control and Harvista™ combinations produced 2–3 times less ethylene than did apples transported immediately after harvest, regardless of the harvest date (Figures 3 and 4). After 6 weeks of transport, expressly lower ethylene production was ensured by treating apples exclusively with SmartFresh™, regardless of the harvest date. A similar relationship, although weaker, occurred after 8 weeks of transport.

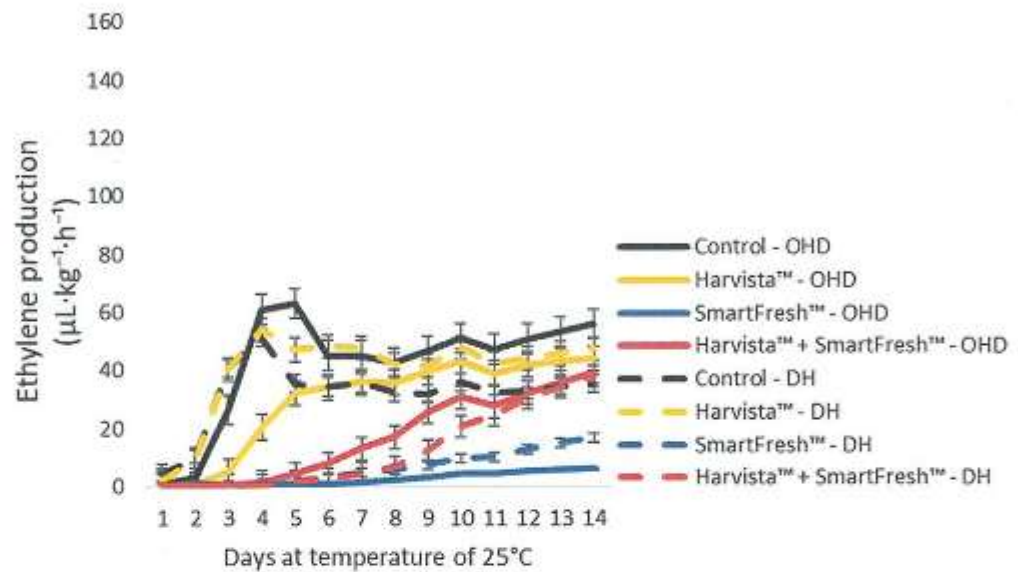


Figure 3. Ethylene production by Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples kept at 25 °C after 9 months of storage plus 6 weeks of simulated transport; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ±, standard deviation; n = 48.

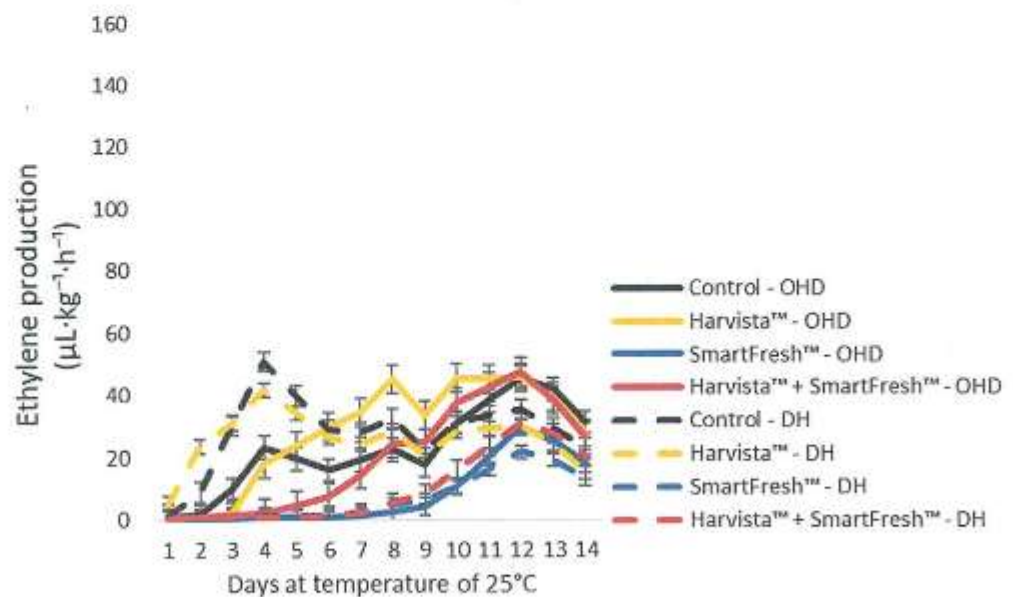


Figure 4. Ethylene production by Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples kept at 25 °C after 9 months of storage plus 8 weeks of simulated transport; OHD—optimal harvest date; DH—delayed harvest; ±, standard deviation; n = 48.

3.2. Firmness

The delay in harvest was found to result in a significant decrease in the flesh firmness of 22 out of 24 evaluated apples transported 6 weeks immediately after harvest. After 8 weeks of transport, apples collected at DH were always characterized by a lower firmness than that of those collected at the OHD (Table 2). It should be also noted that apples not treated with 1-MCP either in the orchard or after harvest, especially if harvested at DH, lost firmness very rapidly under shelf-life conditions. Spraying trees with Harvista™ ensured the high quality of apples, with minimum firmness (55 N) for 14 days of shelf-life, regardless of the transport period, but only if the fruit was harvested at the optimal harvest date. On the other hand, apples collected from trees sprayed with Harvista™ and treated with SmartFresh™ after harvest were always firmer than 55 N, regardless of the harvest date, the transport period, and the length of the shelf-life.

Table 2. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples shipped directly after harvest as affected by 1-MCP treatment, harvest date, length of shelf-life, and transport period.

Harvest Date	Treatment Applied/ <i>p</i> -Value	Days of Shelf-Life			<i>p</i> -Value for Shelf-Life
		0	7	14	
6 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^b 60.2 c	A ^b 52.9 b	A ^b 42.9 a	0.0002
	Harvista™	B ^b 76.8 c	B ^b 65.2 b	B ^b 55.3 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^b 79.7 c	C ^b 74.3 b	C ^b 66.9 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 80.0 c	C ^a 73.6 b	C ^a 63.2 a	0.0003
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 48.9 b	A ^a 40.5 a	A ^a 37.8 a	0.0005
	Harvista™	B ^a 55.7 c	B ^a 48.9 b	B ^a 43.0 a	<0.0001
	SmartFresh™	C ^a 64.1 b	C ^a 59.7 a	C ^a 61.7 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	D ^a 75.8 c	D ^a 71.3 b	C ^a 63.7 a	0.0011
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
	<i>p</i> -Value for the harvest date	0.0396	0.0037	0.0064	
		0.0006	0.0004	0.0008	
		0.0007	0.0004	0.0088	
		0.0002	0.0066	0.1436	
8 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^b 56.0 b	A ^b 55.5 b	A ^b 47.9 a	0.0306
	Harvista™	B ^b 76.6 b	B ^b 71.2 b	B ^b 55.2 a	0.0050
	SmartFresh™	B ^b 77.7 b	B ^b 75.6 b	C ^b 62.9 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 79.9 b	B ^b 75.4 b	C ^b 64.9 a	0.0007
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 46.5 b	A ^a 43.6 ab	A ^a 39.9 a	<0.0001
	Harvista™	A ^a 51.7 b	AB ^a 48.5 ab	AB ^a 44.5 a	0.0529
	SmartFresh™	B ^a 59.9 b	BC ^a 56.6 ab	BC ^a 49.7 a	0.0283
	Harvista™ + SmartFresh™	C ^a 74.0 b	C ^a 68.6 b	C ^a 59.0 a	0.0015
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
	<i>p</i> -Value for the harvest date	<0.0001	0.0380	0.0262	
		0.0004	0.0299	0.0203	
		0.0049	0.0032	0.0010	
		<0.0001	0.0228	0.0241	

Tukey's HSD test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro-Wilk test— $p \leq 0.05$); capital letters in the column are for comparing the impact of 1-MCP applied at a given harvest date, small letters are for comparing the impact of the length of shelf-life, and small letters in superscript are for comparing the impact of delayed harvest in respect of a given shipping period; ™—trademark.

The firmness of apples transported after 9 months of storage is shown in Table 3. Apples, both from the control group and from trees sprayed with Harvista™, were usually characterized by much lower firmness than expected (55 N) under shelf-life conditions, regardless of the harvest date and transport period. The desired firmness value after the 14-day shelf-life period was achieved for apples harvested at the optimal harvest date, treated with SmartFresh™ after harvest, and transported to a distant market for 6 weeks after storage, as well as for apples from the Harvista™ + SmartFresh™ combination regardless of the harvest date, transported for 6 weeks. Taking into account the shorter, 7-day shelf-life on the target market, it was found that the post-harvest treatment of apples with SmartFresh™ (regardless of whether or not the trees had been sprayed with Harvista™) also ensured a firmness greater than 55 N after 8 weeks of transport; this also applied to apples harvested at the delayed harvest date (DH).

Table 3. Flesh firmness (N) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples shipped after 9 months of storage as affected by 1-MCP treatment, harvest date, length of shelf-life, and transport period.

Harvest Date	Treatment Applied/ <i>p</i> -Value	Days of Shelf-Life			<i>p</i> -Value for Shelf-Life
		0	7	14	
6 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^b 54.8 b	A ^a 41.4 a	A ^a 37.5 a	0.0005
	Harvista™	A ^b 59.3 c	B ^b 51.0 b	B ^b 45.1 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^b 73.1 a	C ^b 73.7 a	D ^b 70.5 a	0.7185
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 78.8 b	C ^a 76.1 b	C ^a 62.4 a	0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 44.9 b	A ^a 40.7 ab	A ^a 37.1 a	<0.0001
	Harvista™	A ^a 49.5 c	A ^a 42.6 b	A ^a 38.9 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^a 61.2 b	B ^a 56.2 b	B ^a 44.9 a	0.0054
	Harvista™ + SmartFresh™	C ^a 74.4 b	C ^a 70.5 b	C ^a 59.5 a	<0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
<i>p</i> -Value for the harvest date		0.0004	0.0025	<0.0001	
Control		<0.0001	0.0007	0.0096	
Harvista™		0.0812	0.0057	0.0002	
SmartFresh™		0.0331	0.2063	0.1055	
Harvista™ + SmartFresh™					
8 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^a 45.9 b	A ^a 42.4 b	A ^a 36.5 a	<0.0001
	Harvista™	B ^b 51.7 c	A ^b 44.9 b	A ^b 41.6 a	0.0002
	SmartFresh™	C ^b 71.4 b	B ^b 67.6 b	B ^b 53.0 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	D ^b 76.3 c	B ^a 65.7 b	B ^a 53.2 a	<0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 44.5 b	A ^a 40.4 a	A ^a 37.8 a	0.0110
	Harvista™	A ^a 46.7 c	A ^a 42.3 b	A ^a 37.4 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^a 56.7 b	B ^a 55.4 b	B ^a 45.9 a	0.0083
	Harvista™ + SmartFresh™	C ^a 66.8 b	C ^a 63.2 b	C ^a 52.5 a	0.0014
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
<i>p</i> -Value for the harvest date		0.1664	0.0199	0.7489	
Control		0.0017	0.0172	0.0052	
Harvista™		0.0143	0.0300	0.0676	
SmartFresh™		0.0027	<0.0001	0.0297	
Harvista™ + SmartFresh™					

Tukey's HSD test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro-Wilk test— $p \leq 0.05$); capital letters in the column are for comparing the impact of 1-MCP applied at a given harvest date, small letters are for comparing the impact of the length of shelf-life, and small letters in superscript are for comparing the impact of delayed harvest in respect of a given shipping period; ™—trademark.

3.3. Soluble Solids Content (SSC)

The SSC values in apples transported immediately after harvest are presented Table 4. Apples harvested at the OHD and at DH most often did not differ in terms of SSC in simulated transport conditions, especially after 8 weeks of transport. However, as regards the fruit transported for 6 weeks, apples from trees sprayed with Harvista™ usually contained less SSC than did those treated with SmartFresh™ after harvest. Extending the shelf-life after 6 weeks of transport resulted in an increase in SSC in apples from the Harvista™ + SmartFresh™ treatment, whereas the opposite relationship was noted for apples treated only with one of the above preparations.

Table 4. Soluble solids content SSC (°Bx) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples shipped directly after harvest as affected by 1-MCP treatment, harvest date, length of shelf-life, and transport period.

Harvest Date	Treatment Applied/ <i>p</i> -Value	Days of Shelf-Life			<i>p</i> -Value for Shelf-Life
		0	7	14	
6 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	B ^a 12.4 a	B ^a 12.5 a	A ^a 12.0 a	0.0002
	Harvista™	B ^a 12.4 a	B ^b 12.6 a	AB ^b 12.7 a	<0.0001
	SmartFresh™	C ^b 14.6 b	C ^b 15.0 b	B ^a 13.4 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	A ^a 11.4 a	A ^a 11.4 a	B ^a 13.3 b	0.0003
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 12.7 a	B ^a 12.7 a	AB ^b 12.7 a	0.0005
	Harvista™	A ^a 12.5 b	A ^a 11.4 a	A ^a 11.6 a	<0.0001
	SmartFresh™	A ^a 13.1 a	B ^a 13.1 a	B ^a 13.7 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	A ^b 12.4 a	B ^b 12.6 ab	B ^a 13.4 b	0.0011
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
		0.0396	0.0037	0.0064	
		0.0006	0.0004	0.0008	
		0.0007	0.0004	0.0088	
		0.0002	0.0066	0.1436	
8 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^a 12.4 a	A ^b 12.7 a	B ^a 12.4 a	0.0306
	Harvista™	A ^a 12.2 a	B ^a 13.0 a	B ^a 12.8 a	0.0050
	SmartFresh™	A ^a 12.2 a	B ^b 13.2 b	C ^b 13.9 c	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	A ^a 11.7 a	A ^a 11.9 a	A ^a 11.8 a	0.0007
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 12.4 a	A ^a 11.8 a	A ^a 12.5 a	<0.0001
	Harvista™	A ^a 13.0 a	B ^a 13.1 a	A ^a 12.7 a	0.0529
	SmartFresh™	A ^a 12.4 a	AB ^a 12.4 a	A ^a 12.3 a	0.0283
	Harvista™ + SmartFresh™	A ^b 12.8 a	AB ^b 12.8 a	A ^a 12.3 a	0.0015
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
		<0.0001	0.0380	0.0262	
		0.0004	0.0299	0.0203	
		0.0049	0.0032	0.0010	
		<0.0001	0.0228	0.0241	

Tukey's HSD test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro-Wilk test— $p \leq 0.05$); capital letters in the column are for comparing the impact of 1-MCP applied at a given harvest date, small letters in the line are for comparing the impact of the length of shelf-life, and small letters in superscript are for comparing the impact of delayed harvest in respect of a given shipping period; ™—trademark.

There were also significant fluctuations in the SSC in apples transported after 9 months of storage (Table 5). Apples collected at the OHD had a higher SSC than those harvested at DH, regardless of the length of shelf-life, but this was only observed for apples in the control combination after 6 weeks of transport, while the fruit from the other combinations

usually had similar SSCs. On the other hand, apples treated with SmartFresh™ only and those treated with Harvista™ + SmartFresh™ usually contained more extract than did the fruit in the other two combinations (control and Harvista™) after 14 days shelf-life, regardless of the remaining experimental variables. At the same time, SmartFresh™-only and Harvista™ + SmartFresh™-treated apples showed a higher SSC value after 14 days of shelf-life than they did immediately after transport, but only if they were transported for 8 weeks.

Table 5. Soluble solids content SSC (°Bx) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples shipped after 9 months of storage as affected by 1-MCP treatment, harvest date, length of shelf-life, and transport period.

Harvest Date	Treatment Applied/ <i>p</i> -Value	Days of Shelf-Life			<i>p</i> -Value for Shelf-Life
		0	7	14	
6 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	BC ^b 13.2 a	B ^b 13.5 a	B ^b 13.1 a	0.0005
	Harvista™	AB ^a 12.4 b	A ^a 12.1 ab	A ^a 11.9 a	<0.0001
	SmartFresh™	C ^a 13.5 a	B ^a 13.1 a	B ^a 13.6 a	0.7185
	Harvista™ + SmartFresh™	A ^a 11.9 a	A ^a 11.8 a	A ^a 11.7 a	0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 11.8 ab	AB ^a 12.3 b	A ^a 11.5 a	<0.0001
	Harvista™	AB ^a 12.5 b	A ^a 12.2 b	A ^a 11.1 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^a 13.2 a	B ^a 13.1 a	B ^a 13.2 a	0.0054
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 12.7 a	AB ^a 12.4 a	B ^b 12.6 a	<0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
		0.0004	0.0025	<0.0001	
Control		<0.0001	0.0007	0.0096	
Harvista™		0.0812	0.0057	0.0002	
SmartFresh™		0.0331	0.2063	0.1055	
Harvista™ + SmartFresh™					
8 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	BC ^a 12.9 a	AB ^a 12.1 a	B ^a 12.3 a	<0.0001
	Harvista™	A ^a 11.8 a	A ^a 11.8 a	A ^a 11.5 a	0.0002
	SmartFresh™	C ^a 13.3 a	C ^a 13.3 a	D ^a 14.0 b	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	AB ^a 12.2 a	BC ^b 13.0 b	C ^a 13.2 b	<0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	AB ^a 12.1 a	A ^a 12.1 a	AB ^a 12.5 a	0.0110
	Harvista™	A ^a 11.8 a	A ^a 12.0 a	A ^a 11.7 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^a 12.8 a	B ^a 13.6 ab	C ^a 14.0 b	0.0083
	Harvista™ + SmartFresh™	AB ^a 12.1 a	A ^a 12.1 a	B ^a 12.8 b	0.0014
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
		0.1664	0.0199	0.7489	
Control		0.0017	0.0172	0.0052	
Harvista™		0.0143	0.0300	0.0676	
SmartFresh™		0.0027	<0.0001	0.0297	
Harvista™ + SmartFresh™					

Tukey's HSD test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro–Wilk test— $p \leq 0.05$); capital letters in the column are for comparing the impact of 1-MCP applied at a given harvest date, small letters are for comparing the impact of the length of shelf-life, and small letters in superscript are for comparing the impact of delayed harvest in respect of a given shipping period; ™—trademark.

3.4. Titratable Acidity (TA)

The TA of apples transported immediately after harvest is presented in Table 6. The apples harvested at the OHD usually had a higher acidity than did the fruit harvested later, regardless of the 1-MCP treatment, the length of transport, and the shelf-life. On the other hand, apart from the apples assessed after 6 weeks of transport + 14 days of shelf-life, the effect of the 1-MCP treatment on TA was usually significant, regardless of the

harvest date, although it showed some variability depending on the measurement date. The effect of 1-MCP on the TA value was found to be less stable after 6 weeks than after 8 weeks of simulated transport. During the shelf-life following the 8-week transportation period, the acidity of apples treated with SmartFresh™ and Harvista™ + SmartFresh was usually greater than that of control fruit. At that time, control and Harvista™-treated apples generally did not differ in terms of acidity. In the experiment, the rate of TA decline differed among the fruit samples as the shelf-life became longer. The exception was apples treated with Harvista™ and Harvista™ + SmartFresh™ and harvested at the delayed harvest date. The analysis carried out after the respective shelf-life periods following 6 weeks of transport did not reveal any differences between them in this respect.

Table 6. Titratable acidity, TA (%), of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples shipped directly after harvest as affected by 1-MCP treatment, harvest date, length of shelf-life, and transport period.

Harvest Date	Treatment Applied/ <i>p</i> -Value	Days of Shelf-Life			<i>p</i> -Value for Shelf-Life
		0	7	14	
6 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	B ^a 0.366 b	A ^b 0.332 a	A ^b 0.309 a	0.0013
	Harvista™	AB ^b 0.364 b	A ^b 0.350 b	A ^a 0.306 a	0.0001
	SmartFresh™	C ^b 0.427 b	B ^b 0.397 b	A ^b 0.322 a	0.0004
	Harvista™ + SmartFresh™	A ^b 0.341 ab	AB ^b 0.356 b	A ^b 0.330 a	0.0073
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	0.0085	0.0516	
Harvest II (delayed harvest)	Control	C ^a 0.356 c	B ^a 0.297 b	A ^a 0.263 a	0.0008
	Harvista™	A ^a 0.286 a	A ^a 0.254 a	A ^a 0.286 a	0.0401
	SmartFresh™	C ^a 0.360 c	B ^a 0.305 b	A ^a 0.273 a	<0.0001
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^a 0.310 a	B ^a 0.293 a	A ^a 0.281 a	0.2406
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	0.0024	0.3626	
Control		0.2917	0.0298	0.0037	
Harvista™		0.0002	<0.0001	0.1134	
SmartFresh™	<i>p</i> -Value for the harvest date	<0.0001	0.0019	0.0025	
Harvista™ + SmartFresh™		0.0331	0.0021	0.0093	
8 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	AB ^b 0.333 b	AB ^b 0.321 b	A ^a 0.218 a	<0.0001
	Harvista™	A ^b 0.321 b	A ^b 0.300 ab	B ^b 0.287 a	0.0043
	SmartFresh™	C ^b 0.387 b	B ^b 0.334 a	B ^b 0.319 a	0.0004
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 0.367 b	C ^b 0.374 b	B ^b 0.286 a	0.0008
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	0.0015	<0.0001	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 0.233 a	AB ^a 0.273 b	A ^a 0.232 a	<0.0001
	Harvista™	A ^a 0.229 ab	A ^a 0.256 b	A ^a 0.215 a	0.0169
	SmartFresh™	B ^a 0.304 ab	C ^a 0.314 b	B ^a 0.282 a	0.0224
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^a 0.311 b	B ^a 0.297 b	A ^a 0.234 a	0.0007
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	0.0006	0.0015	
Control		<0.0001	0.0019	0.2440	
Harvista™		0.0001	0.0003	0.0008	
SmartFresh™	<i>p</i> -Value for the harvest date	0.0007	0.0157	0.0135	
Harvista™ + SmartFresh™		0.0128	0.0010	0.0214	

Tukey's HSD test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro–Wilk test— $p \leq 0.05$); capital letters in the column are for comparing the impact of 1-MCP applied at a given harvest date, small letters are for comparing the impact of length of shelf-life, and small letters in superscript are for comparing the impact of delayed harvest in respect of a given shipping period; ™—trademark.

The TA results obtained for apples transported after 9 months of storage under ULO conditions are presented in Table 7. Surprisingly, the pre-existing differences in apple acidity associated with the harvest date mostly disappeared. At the same time, the impact of 1-MCP on the TA value was much more pronounced, regardless of the harvest date

and the length of transport. Although the application of SmartFresh™ almost always resulted in higher acidity compared to that of the control combination, spraying trees with Harvista™ was only slightly less effective than was using SmartFresh™. Similarly to transport immediately after harvest, the shelf-life period had a significant impact on fruit acidity. Despite some differences between the fruit samples in the TA decline rate along with the increase in shelf-life, apples had always lower acidity after 14 days at 25 °C than they did immediately after transport (0 days of shelf-life). The exceptions to this rule were apples treated with SmartFresh™, collected at both harvest dates and transported for 6 weeks, as well as control apples harvested with a delay and transported for 8 weeks after storage. In those three cases, the apples did not differ in terms of TA at any time of measurement.

Table 7. Titratable acidity TA (%) of Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples shipped after 9 months of storage as affected by 1-MCP treatment, harvest date, length of shelf-life, and transport period.

Harvest Date	Treatment Applied/ <i>p</i> -Value	Days Of Shelf-Life			<i>p</i> -Value for Shelf-Life
		0	7	14	
6 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^a 0.228 c	A ^a 0.196 b	A ^a 0.165 a	<0.0001
	Harvista™	B ^b 0.252 b	AB ^b 0.237 b	B ^b 0.189 a	0.0003
	SmartFresh™	B ^b 0.260 a	B ^b 0.252 a	C ^a 0.217 a	0.1271
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 0.260 b	B ^b 0.257 b	C ^a 0.213 a	0.0007
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	0.0036	0.0251	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 0.206 b	A ^a 0.184 ab	A ^a 0.156 a	0.0066
	Harvista™	B ^b 0.245 c	AB ^b 0.199 b	A ^a 0.173 a	<0.0001
	SmartFresh™	AB ^a 0.230 a	B ^b 0.236 a	B ^b 0.220 a	0.6805
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 0.242 b	B ^b 0.245 b	B ^b 0.210 a	0.0004
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	0.0028	0.0055	<0.0001	
<i>p</i> -Value for the harvest date		0.0790	0.2410	0.1477	
Control		0.1805	0.0109	0.1029	
Harvista™		0.0251	0.4389	0.7299	
SmartFresh™		0.0238	0.2417	0.6781	
Harvista™ + SmartFresh™					
8 Weeks of Transport					
Harvest I (optimal harvest date)	Control	A ^a 0.194 b	A ^a 0.191 b	A ^a 0.157 a	0.0128
	Harvista™	B ^b 0.246 b	B ^b 0.230 ab	B ^b 0.200 a	0.0164
	SmartFresh™	B ^b 0.265 b	AB ^b 0.225 a	C ^a 0.226 a	0.0085
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 0.278 c	B ^b 0.254 b	C ^a 0.220 a	0.0001
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	<0.0001	0.0037	<0.0001	
Harvest II (delayed harvest)	Control	A ^a 0.193 a	A ^a 0.190 a	B ^b 0.205 a	0.4354
	Harvista™	B ^b 0.271 b	A ^a 0.199 a	A ^a 0.175 a	<0.0001
	SmartFresh™	B ^b 0.264 b	B ^b 0.234 a	C ^a 0.227 a	0.0051
	Harvista™ + SmartFresh™	B ^b 0.256 b	B ^b 0.245 b	BC ^a 0.213 a	0.0006
	<i>p</i> -Value for the combinations with 1-MCP	0.0352	0.0005	<0.0001	
<i>p</i> -Value for the harvest date		0.8475	0.9093	<0.0001	
I Harvista™		0.1456	0.0178	0.0094	
SmartFresh™		0.9296	0.5402	0.8414	
Harvista™ + SmartFresh™		0.0130	0.2127	0.4140	

Tukey's HSD test; normal distribution (normality was checked using the Shapiro–Wilk test— $p < 0.05$); capital letters in the column are for comparing the impact of 1-MCP applied at a given harvest date, small letters are for comparing the impact of the length of shelf-life, and small letters in superscript are for comparing the impact of delayed harvest in respect of a given shipping period; ™—trademark.

4. Discussion

The increasing production of apples concurrent with a decline in their consumption in Poland [2,3] forces apple producers to search for new markets. Consumers are increasing their demands and expect apples to be well colored and have firm and juicy flesh all year round [25]. Therefore, the aim of the experiment described in this paper was to determine the effect of the pre- and post-harvest use of 1-MCP on changes in the quality of Gala Schniga[®] SchniCo Red(s) apples transported immediately after harvest or after storage in ULO conditions (1.2% CO₂ and 1.2% O₂). Particular attention was paid to the possibility of maintaining minimum firmness at above 55 N, which is the basic criterion for high-quality apples as assessed by consumers [4]. The study noted a significant effect of 1-MCP, harvest date, and shelf-life length on such parameters as ethylene production rate, firmness, SSC, and TA in apples subjected to simulated transport both immediately after harvest and after 9 months of storage, regardless of the shipping period.

It has been mentioned that firmness plays a key role in assessing the quality of apples [26,27]. This work proves that 1-MCP-treated apples harvested at the optimal harvest date (OHD) maintained firmness at above 55 N for 14 days after both 6 and 8 weeks of refrigerated transport, if the transport started immediately after harvest. The desired firmness could be maintained after 9 months of storage, for 14 days on the target market, if the apples were treated with 1-MCP before and after harvest, but this only applied to apples transported for 6 weeks, regardless of the harvest date. After 8 weeks of transport, the desired firmness could be maintained for only 7 days at 25 °C for apples treated with SmartFresh™ and those treated with Harvista™ + SmartFresh™, regardless of the harvest date. In the presented study, the firmness loss rate in apples as a climacteric fruit was associated with the intensity of ethylene production. Therefore, as also noted in the literature [19], the use of 1-MCP (ethylene inhibitor) had a clearly positive effect on the firmness and the shelf-life of apples.

Some researchers believe that fruit with ethylene receptors blocked by 1-MCP may not regain their ability to ripen after storage [28,29]. For example, pears [30], and bananas [31] did not ripen after 1-MCP was used in high concentrations. In this study, 1-MCP did not completely block the ripening of the 'Gala' apples. One of the signs of the post-harvest ripening of apples is a decrease in the firmness of fruit flesh, accompanied by increased ethylene production [10]. This relationship was also observed in this study, but the above processes were slow after the use of 1-MCP. Apples treated with 1-MCP after harvest produced less ethylene than did apples from trees sprayed with 1-MCP before harvest. It can therefore be concluded that apples remaining on the tree after 1-MCP treatment may form new ethylene receptors, and, consequently, produce more ethylene than apples treated with 1-MCP after harvest thus confirming the observations presented in other papers [32,33]. It is commonly known that a physiological reaction to ethylene requires the binding of ethylene to ethylene receptors. During the presented studies, it was found that applying 1-MCP twice (before and after harvest) effectively reduced deteriorations in fruit quality, which is consistent with the results of other studies [18,22,34].

In addition, it was shown that the delay in the harvest date also significantly affected the firmness decline rate of apples transported immediately after harvest. Thongkum et al. believe that the expression of genes involved in ethylene production depends on fruit maturity. Therefore, those genes are less expressed in unripe and overripe fruit than in fruit with optimal maturity, which is reflected in ethylene production [35]. In this study, fruit harvested at the delayed harvest date (DHI) produced more ethylene than did fruit harvested at the optimal harvest date (OHD), but this was only the case for apples transported immediately after harvest. Apples untreated with 1-MCP (control) and apples from trees sprayed with Harvista™ produced less ethylene after 9 months of storage than they did when transported immediately after harvest.

According to consumers' perceptions, the firmness and juiciness of apple flesh are indicators of freshness [36], while SSC and TA are associated with nutritional values [7,37]. In our study, the post-harvest use of 1-MCP resulted in higher SSCs than did spraying

trees with Harvista™. Błaszczyk and Gasparski [38] also noted an increase in SSC after the post-harvest use of 1-MCP. Of course, SSC and TA decrease as the fruit ripens, but the decrease rate is related to the length of storage [39]. Nevertheless, opinions are divided over the effect of 1-MCP on the course of changes in SSC in apples. Rupasinghe et al. argue that 1-MCP has no significant effect on SSC in apples [40,41]. Additionally, other studies conducted on apple cultivars, including those on ‘Summer Prince’ and ‘Summer King’ [42], and ‘Hongkum’ [43], have not shown a significant effect of 1-MCP on SSC. Other researchers believe that, SSC in apples after the use of 1-MCP can be either lower or higher, depending on, e.g., the cultivar or orchard location [44].

The harvest date significantly affected the acidity of the apples. The decrease in acidity associated with delayed harvest was recorded mainly in the apples harvested at DH and transported immediately after harvest. Organic acids, such as sugars, are the basic substrates in fruit respiration. For this reason, the loss of acidity was generally significant later into the shelf-life. The use of 1-MCP, especially after harvest, was visibly effective in maintaining higher acidity of apples. This can be explained by lower ethylene production, which, assumably, limited respiration, thus contributing to a lower consumption of organic acids in the respiration process, as reported by other authors [45–48]. Since consumers prefer fruit with a well-balanced sugar-acid ratio [4], the use of 1-MCP seems fully justified, especially if the fruit is to be transported to distant markets. This is particularly important for ‘Gala’ apples, which are characterized by relatively low acidity and which may be perceived by consumers as too sweet if their acidity significantly decreases.

5. Conclusions

Treatment with Harvista™ alone can only be recommended for apples intended for transport immediately after harvest. Then, only apples harvested at the optimal harvest date can be transported for 6 weeks, without the risk of an excessive reduction in their firmness when keeping them at 25 °C for the next 14 days. The double application of 1-MCP (Harvista™ + SmartFresh™) to Gala Schniga® SchniCo Red(s) apples, including the apples harvested 2 weeks after the optimal harvest date, ensured that the apples retained the desired firmness on the target market for 14 days after 6 weeks of transport preceded by 9 months of storage under ULO conditions. Apples from the delayed harvest, which were treated with SmartFresh™, stored for 9 months and transported for 8 weeks maintained the desired firmness during the shelf-life of 7 days. Changes in the values of this quality indicator showed some convergence with the production of ethylene.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture13112045/s1>. Table S1. The weather conditions in the apple orchard in the year 2021 against the background of long-term data; Table S2. The *p*-value of the influence of individual experimental factors and interactions on the physicochemical properties of fruit shipped directly after harvest; Table S3. The *p*-value of the influence of individual experimental factors and interactions on the physicochemical properties of fruit shipped after 9 months of storage.

Author Contributions: Conceptualization, M.M. and K.T.; methodology, M.M.; software M.M.; validation, M.M.; formal analysis, M.M. and K.T.; investigation, M.M. and K.T.; resources, M.M. and K.T.; data curation, M.M. and K.T.; writing—original draft preparation, M.M. and K.T.; writing—review and editing, M.M. and K.T.; visualization, M.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Polish Ministry of Science and Higher Education within the funds of Institute of Horticulture Sciences, Warsaw University of Life Sciences (WULS), for scientific research. The experiment was financed by AgroFresh Polska Sp. z o. o., which provided Harvista™ and SmartFresh™ ProTabs preparations for pre-harvest and post-harvest use.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. The Apple Market in the EU: Vol. 1: Production, Areas and Yields. Available online: https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2022-10/apples-production_en.pdf (accessed on 4 August 2023).
2. Trajer, M.; Dyngus, M. Krajowa Produkcja, Spożycie Oraz Promocja Owoców i Warzyw, Agencja Rynku Rolnego, Biuletyn Informacyjny, nr 3. 2013, pp. 6–27. Available online: www.faostat.fao.org (accessed on 4 August 2023).
3. O’Neil, C.E.; Nicklas, T.A.; Fulgoni, V.L. Consumption of apples is associated with a better diet quality and reduced risk of obesity in children: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003–2010. *Nutr. J.* **2015**, *14*, 48. [CrossRef]
4. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbuehl, B.; Casutt, M. Consumer demands on eating quality of apples: Minimum requirements on firmness, soluble solids and acidity. *Acta Hort.* **2003**, *600*, 693–696. [CrossRef]
5. Wang, Y.; Lu, Q.; Li, B.; Si, Y.; Wang, Y.; Sun, J.; Yuan, H.; Wang, A. LED white light-activated transcription factor MdHY5 inhibits ethylene biosynthesis during apple fruit ripening. *Postharvest Biol. Technol.* **2023**, *202*, 112372. [CrossRef]
6. Feder, A.; Jensen, S.; Wang, A.; Courtney, L.; Middleton, L.; Van Eck, J.; Liu, Y.; Giovannoni, J.J. Tomato fruit as a model for tissue-specific gene silencing in crop plants. *J. Hort. Res.* **2020**, *7*, 42. [CrossRef] [PubMed]
7. Fu, L.; Liu, S.Y.; Xu, F.X. Effect of treatment with MeJA on physiology and biochemistry in blueberry fruit. *J. Southeast Univ. Nat. Sci. Ed.* **2017**, *35*, 473–475.
8. Xu, F.X.; Liu, S.Y. Control of ethylene activity in blueberry fruit by combined 1-methylcyclopropene (1-MCP) and UV-C irradiation. *Food Bioproc Technol.* **2017**, *10*, 1695–1703. [CrossRef]
9. Chen, T.; Qin, G.; Tian, S. Regulatory network of fruit ripening: Current understanding and future challenges. *New Phytol.* **2020**, *228*, 1219–1226. [CrossRef]
10. Barry, C.S.; Giovannoni, J.J. Ethylene and fruit ripening. *J. Plant Growth Regul.* **2007**, *26*, 143. [CrossRef]
11. Mattheis, J.P. How 1-methylcyclopropene has altered the Washington State apple industry. *HortScience* **2008**, *43*, 99–101. [CrossRef]
12. Kvikliene, N. Effect of harvest date on apple fruit quality and storage ability. *Folia Hort.* **2001**, *13*, 97–102.
13. Lysiak, G. Measurement of ethylene production as a method for determining the optimum harvest date of ‘Jonagored’ apples. *Folia Hort.* **2014**, *26*, 117–124. [CrossRef]
14. Lysiak, G.; Kurlus, R.; Zydlik, Z.; Walkowiak-Tomczak, D. Apple skin colour changes during harvest as an indicator of maturity. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2014**, *13*, 71–83.
15. Sugar, D.; Einhorn, T.C. Conditioning temperature and harvest maturity influence induction of ripening capacity in ‘d’Anjou’ pear fruit. *Postharvest Biol. Technol.* **2011**, *60*, 121–124. [CrossRef]
16. Jan, I.; Rab, A.; Sajid, M. Storage performance of apple cultivars harvested at different stages of maturity. *J. Anim. Plant Sci.* **2012**, *22*, 438–447.
17. Lysiak, G. The influence of harvest maturity and basic macroelement content in fruit on the incidence of diseases and disorders after storage of the ‘Ligol’ apple cultivar. *Folia Hort.* **2013**, *25*, 31–39. [CrossRef]
18. Małachowska, M.; Tomala, K. Effect of preharvest and postharvest application of 1-mcp on the quality of Gala Schniga® Schnico Red(s) apples during long-term storage. *Agriculture* **2022**, *12*, 2073. [CrossRef]
19. Blankenship, S.M.; Dol, J.M. 1-Methylcyclopropene: A review. *Postharvest Biol. Technol.* **2003**, *28*, 1–25. [CrossRef]
20. Tomala, K.; Małachowska, M.; Guzek, D.; Głabska, D.; Gutkowska, K. The effects of 1-methylcyclopropene treatment on the fruit quality of ‘Idared’ apples during storage and transportation. *Agriculture* **2020**, *10*, 490. [CrossRef]
21. Tomala, K.; Guzek, D.; Głabska, D.; Małachowska, M.; Krupa, T.; Gutkowska, K. The influence of 1-methylcyclopropene on the quality parameters of Idared apples after 8 weeks of storage simulating long-distance transportation. *Agronomy* **2021**, *11*, 528. [CrossRef]
22. Tomala, K.; Guzek, D.; Głabska, D.; Małachowska, M.; Wiślak, L.; Krupa, T.; Gutkowska, K. Assessment of the quality of ‘Red Jonaprince’ apples during storage after delayed harvesting and 1-methylcyclopropene (1-mcp) preharvest and postharvest treatment. *Agronomy* **2023**, *13*, 1730. [CrossRef]
23. Bühlmann, A.; Rebeaud, S.G. Empfehlungen für die Obstlagerung. *Obstlagerung* **2017**, *17*, 11–14.
24. Lysiak, G. The determination of harvest index of Šampion apples intended for long storage. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **2011**, *10*, 273–282.
25. Chen, B.; Mao, J.; Huang, B.; Mi, B.; Liu, Y.; Hu, Z. Effect of bagging and time of harvest on fruit quality of ‘Red Fuji’ apple in high altitude area in China. *Fruits* **2017**, *72*, 36–46. [CrossRef]
26. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbühl, B.; Künsch, U. Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharvest Biol. Technol.* **2003**, *27*, 27–37. [CrossRef]
27. Barreiro, P.; Ruiz-Altisent, M.; Valerio, C.; García-Ramos, J. Fruit postharvest technology: Instrumental measurement of ripeness and quality. In *Production Practices and Quality Assessment of Food Crops*; Dris, R., Jain, S.M., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2006; pp. 321–340. [CrossRef]
28. Dong, X.; Huber, D.J.; Ramirez-Sánchez, M.; Rao, J.; Lee, J.; Watkins, C.B. Cultivar differences in gaseous 1-methylcyclopropene accumulation in whole and fresh-cut apple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* **2014**, *93*, 130–134. [CrossRef]

29. Wang, Y.; Sugar, D. 1-MCP efficacy in extending storage life of 'Bartlett' pears is affected by harvest maturity, production elevation, and holding temperature during treatment delay. *Postharvest Biol. Technol.* **2015**, *103*, 1–8. [[CrossRef](#)]
30. Chiriboga, M.A.; Schotsmans, W.C.; Larrigaudière, C.; Dupille, E.; Recasens, I. How to prevent ripening blockage in 1-MCP-treated 'Conference' pears. *J. Sci. Food Agric.* **2011**, *91*, 1781–1788. [[CrossRef](#)]
31. Watkins, C.B. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotech. Adv.* **2006**, *24*, 389–409. [[CrossRef](#)]
32. McCartney, S.J.; Obemiller, J.D.; Schopp, J.R.; Parkeer, M.L.; Edgington, T.B. Preharvest 1-methylcyclopropene delays fruit maturity and reduces softening and superficial scald of apples during long-term storage. *HortScience* **2008**, *43*, 366–371. [[CrossRef](#)]
33. Villalobos-Acuña, M.G.; Biasi, W.V.; Flores, S.; Mitcham, E.J.; Elkins, R.B.; Willits, N.H. Preharvest application of 1-methylcyclopropene influences fruit drop and storage potential of 'Bartlett' pears. *HortScience* **2010**, *45*, 610–616. [[CrossRef](#)]
34. Deell, J.R.; Lum, G.B.; Ehsani-Moghaddam, B. Effects of multiple 1-methylcyclopropene treatments on apple fruit quality and disorders in controlled atmosphere storage. *Postharvest Biol. Technol.* **2016**, *111*, 93–98. [[CrossRef](#)]
35. Thongkum, M.; McAtee, P.M.; Schaffer, R.J.; Allan, A.C.; Ketsa, S. Characterization and differential expression of ethylene receptor genes during fruit development and dehiscence of durian (*Durio zibethinus*). *Sci. Hortic.* **2018**, *240*, 623–630. [[CrossRef](#)]
36. Péneau, S.; Hoehn, E.; Roth, H.-R.; Escher, F.; Nuessli, J. Importance and consumer perception of freshness of apples. *Food Qual. Prefer.* **2006**, *17*, 9–19. [[CrossRef](#)]
37. Jha, S.N.; Rai, D.R.; Shrama, R. Physico-chemical quality parameters and overall quality index of apple during storage. *J. Food Sci. Technol.* **2011**, *49*, 594–600. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Błaszczuk, J.; Gasparski, K. Influence of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the quality and storability of 'Red Jonaprince' apples stored in different conditions. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus.* **2019**, *18*, 7–15. [[CrossRef](#)]
39. Cheng, Z.; Zhou, W.; Gong, X.; Wei, X.; Li, J.; Peng, Z. Physicochemical changes of custard apple at different storage temperatures. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *392*, 052013. [[CrossRef](#)]
40. Rupasinghe, H.P.V.; Murr, D.P.; Paliyath, G.; Skog, I. Inhibitory effect of 1-MCP on ripening and superficial scald development in 'McIntosh' and 'Delicious' apples. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2000**, *75*, 271–276. [[CrossRef](#)]
41. DeEll, J.R.; Lum, G.B. Effects of low oxygen storage and 1-methylcyclopropene on storage disorders of 'Empire' apples. *HortScience* **2017**, *52*, 1265–1270. [[CrossRef](#)]
42. Yoo, J.; Kim, S.H.; Kwon, J.G.; Cho, Y.J.; Kang, I.K. Effects of 1-methylcyclopropene treatments on fruit quality attributes and cell wall metabolism in cold stored 'Summer Prince' and 'Summer King' apples. *Hortic. Sci. Technol.* **2020**, *38*, 660–674. [[CrossRef](#)]
43. Yoo, J.; Jung, H.; Win, N.M.; Kwon, J.G.; Cho, Y.J.; Jung, H.Y.; Lee, D.H.; Kang, I.K. Changes in fruit quality attributes, cell wall materials, and related hydrolases activities in 1-methylcyclopropene (1-MCP)-treated 'Honggeum' apples during cold storage. *Hortic. Sci. Technol.* **2020**, *38*, 870–879. [[CrossRef](#)]
44. Moran, R.E.; McManus, P. Firmness retention, and prevention of coreline browning and senescence in 'Macoun' apples with 1-methylcyclopropene. *HortScience* **2005**, *40*, 161–163. [[CrossRef](#)]
45. Steffens, C.A.; Soardi, K.; Heinzen, A.S.; Amaral Vignali Alves, J.; Silva, J.C.; Talamini do Amarante, C.V.; Brackmann, A. Quality of "Cripps Pink" apples following the application of 1-MCP, ethanol vapor and nitric oxide as pretreatments for controlled atmosphere storage. *J. Food Process. Preserv.* **2021**, *46*, e16121. [[CrossRef](#)]
46. Pre-Aymard, C.; Fallik, E.; Weksler, A.; Lurie, S. Sensory analysis and instrumental measurements of 'Anna' apples treated with 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biol. Technol.* **2005**, *36*, 135–142. [[CrossRef](#)]
47. Toivonen, P.M.A.; Lu, C.W. Studies on elevated temperature, short-term storage of 'Sunrise' summer apples using 1-MCP to maintain quality. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2005**, *80*, 439–446. [[CrossRef](#)]
48. Łysiak, G.P.; Rutkowski, K.; Walkowiak-Tomczak, D. Effect of Storage Conditions on Storability and Antioxidant Potential of Pears cv. 'Conference'. *Agriculture* **2021**, *11*, 545. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Table S1. The weather conditions in the apple orchard in the year 2021 against the background of long-term data.

Month	Sum of rainfalls in 2021 [mm·m ⁻²]	Rainfalls [1991-2020]	Average temperature in 2021 [°C]	Temperature [1991-2020]
January	31.0	31.5	-1.4	-1.6
February	27.6	26.2	-2.0	-0.4
March	18.3	29.1	4.0	3.3
April	55.3	35.7	6.5	8.5
May	62.3	55.8	12.4	13.9
June	69.2	64.4	19.7	16.8
July	118.8	82.1	21.7	20.5
August	140.1	60.2	17.2	18.6
September	31.7	50.3	13.6	13.9
October	9.5	39.6	10.0	10.2
November	35.4	39.4	5.3	5.1
December	18.6	36.5	-1.1	0.3

Table S2. The p-value of the influence of individual experimental factors and interactions on the physicochemical properties of fruit shipped directly after harvest.

		Firmness	SSC	TA
6 Weeks of Transport				
Harvest Date (A)	optimal harvest date	65.8 ± 2.0	12.8 ± 0.3	0.350 ± 0.011
	delayed harvest	55.9 ± 1.4	12.6 ± 0.3	0.297 ± 0.012
	p-value	<0.0001	0.1537	<0.0001
Treatment Applied (B)	Control	47.2 ± 2.5	12.5 ± 0.3	0.321 ± 0.011
	Harvista™	57.1 ± 1.7	12.2 ± 0.3	0.308 ± 0.011
	SmartFresh™	67.7 ± 1.1	13.8 ± 0.4	0.347 ± 0.011
	Harvista™ + SmartFresh™	71.3 ± 1.3	12.4 ± 0.3	0.319 ± 0.011
	p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Days of Shelf-life (C)	0	67.7 ± 1.7	12.7 ± 0.2	0.351 ± 0.010
	7	60.8 ± 1.7	12.6 ± 0.3	0.323 ± 0.013
	14	54.1 ± 1.6	12.8 ± 0.4	0.296 ± 0.011
	p-value	<0.0001	0.2485	<0.0001
A*B		<0.0001	<0.0001	0.0003
A*C		<0.0001	0.1589	0.0007
B*C	p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A*B*C		0.2673	<0.0001	0.0013
8 Weeks of Transport				
Harvest Date (A)	optimal harvest date	66.6 ± 2.7	12.5 ± 0.2	0.321 ± 0.011
	delayed harvest	53.5 ± 2.1	12.5 ± 0.3	0.265 ± 0.012
	p-value	<0.0001	0.9167	<0.0001
Treatment Applied (B)	Control	48.2 ± 2.2	12.3 ± 0.2	0.268 ± 0.010
	Harvista™	57.9 ± 2.8	12.8 ± 0.3	0.268 ± 0.011
	SmartFresh™	63.7 ± 2.6	12.7 ± 0.3	0.323 ± 0.010
	Harvista™ + SmartFresh™	70.3 ± 2.0	12.2 ± 0.2	0.311 ± 0.016
	p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Days of Shelf-life (C)	0	65.3 ± 1.7	12.4 ± 0.1	0.311 ± 0.013
	7	61.9 ± 2.9	12.6 ± 0.4	0.309 ± 0.010
	14	53.0 ± 2.7	12.6 ± 0.3	0.259 ± 0.013

	p-value	<0.0001	0.0311	<0.0001
A*B		<0.0001	<0.0001	0.0330
A*C		0.0031	0.0002	<0.0001
B*C	p-value	0.0712	0.0075	<0.0001
A*B*C		0.1127	0.0138	<0.0001

SSC – soluble solids content; TA – titratable acidity; optimal harvest date – Harvest I; delayed harvest – Harvest II; TM – trademark; ±, standard deviation.

Table S3. The p-value of the influence of individual experimental factors and interactions on the physicochemical properties of fruit shipped after 9 months of storage.

		Firmness	SSC	Acidity
6 Weeks of Transport				
Harvest Date (A)	optimal harvest date	60.3 ± 1.4	12.6 ± 0.3	0.227 ± 0.008
	delayed harvest	51.7 ± 1.9	12.4 ± 0.3	0.212 ± 0.008
	p-value	<0.0001	0.0007	<0.0001
Treatment Applied (B)	Control	42.7 ± 1.7	12.6 ± 0.3	0.189 ± 0.007
	Harvista TM	47.7 ± 1.2	12.0 ± 0.2	0.216 ± 0.010
	SmartFresh TM	63.3 ± 2.2	13.3 ± 0.3	0.236 ± 0.010
	Harvista TM + SmartFresh TM	70.3 ± 1.6	12.2 ± 0.2	0.238 ± 0.007
	p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Days of Shelf-life (C)	0	62.0 ± 2.2	12.6 ± 0.3	0.240 ± 0.008
	7	56.5 ± 1.5	12.6 ± 0.3	0.226 ± 0.011
	14	49.5 ± 1.2	12.3 ± 0.2	0.193 ± 0.007
	p-value	<0.0001	0.0082	<0.0001
A*B		<0.0001	<0.0001	0.6437
A*C		0.7604	0.1868	0.0775
B*C	p-value	<0.0001	0.0012	0.0004
A*B*C		<0.0001	0.4212	0.1827
8 Weeks of Transport				
Harvest Date (A)	optimal harvest date	54.2 ± 1.5	12.6 ± 0.3	0.224 ± 0.009
	delayed harvest	49.1 ± 1.8	12.5 ± 0.3	0.223 ± 0.008
	p-value	<0.0001	0.0513	0.6740
Treatment Applied (B)	Control	41.2 ± 1.2	12.3 ± 0.4	0.188 ± 0.008
	Harvista TM	44.1 ± 0.6	11.7 ± 0.2	0.220 ± 0.010
	SmartFresh TM	58.3 ± 2.4	13.5 ± 0.3	0.240 ± 0.009
	Harvista TM + SmartFresh TM	63.0 ± 2.3	12.6 ± 0.2	0.244 ± 0.007
	p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Days of Shelf-life (C)	0	57.5 ± 1.6	12.4 ± 0.3	0.246 ± 0.008
	7	52.7 ± 1.7	12.5 ± 0.2	0.221 ± 0.011
	14	44.7 ± 1.6	12.7 ± 0.3	0.203 ± 0.007
	p-value	<0.0001	0.0012	<0.0001
A*B		<0.0001	0.0992	0.0011
A*C		0.0009	0.2829	0.1585
B*C	p-value	<0.0001	0.0002	<0.0001
A*B*C		0.1441	0.0607	<0.0001

SSC – soluble solids content; TA – titratable acidity; optimal harvest date – Harvest I; delayed harvest – Harvest II; TM – trademark; ±, standard deviation.

Warszawa, dn. 25.02.2026 r.

Mgr inż. Maria Małachowska

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa

Instytut Nauk Ogrodniczych

maria_małachowska@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo

Szkoły Głównej Gospodarstwa

Wiejskiego w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Małachowska, M., Tomala, K. **Apple quality during shelf-life after long-term storage and simulated transport.** Agriculture, 2023, 13 (11), 2045

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu metodologii badań, przygotowaniu i wykorzystaniu oprogramowania oraz narzędzi analitycznych, przeprowadzeniu walidacji, przygotowaniu wizualizacji wyników, a także na wykonaniu analizy formalnej, realizacji badań, zapewnieniu zasobów niezbędnych do wykonania eksperymentu, opracowaniu i porządkowaniu danych oraz przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu i udziale w jego późniejszej redakcji i korektach, co stanowi 75% pracy.

Podpis


.....

Warszawa, dn. 25.02.2026 r.

Prof. dr hab., dr h.c. Kazimierz Tomala

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa

Instytut Nauk Ogrodniczych

kazimierz_tomala@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo

Szkoły Głównej Gospodarstwa

Wiejskiego w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Małachowska, M., Tomala, K. **Apple quality during shelf-life after long-term storage and simulated transport.** Agriculture, 2023, 13 (11), 2045

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu analizy formalnej, realizacji badań, zapewnieniu zasobów niezbędnych do wykonania eksperymentu, opracowaniu i porządkowaniu danych oraz przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu, a także udziale w jego późniejszej redakcji i korektach, co stanowi **25%** pracy.

Podpis

.....

