

ЩЕРБАТЮК ТЕТЯНА

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0003-1144-8006>
e-mail: shcherbatiuk.th@knuud.edu.ua

АНДРЕЄВА ОЛЬГА

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0001-8374-2306>
e-mail: wayfarer14@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ОЗОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОСЛИННИЦТВІ

Наведено стислий огляд опублікованих у рецензованих виданнях протягом останніх трьох років досліджень, присвячених результатам застосування озону у рослинництві. Проаналізовано три напрями використання цього реагенту: 1) зменшення концентрації фунгіциду, підвищення зростання та якості овочевих культур за допомогою фертигації; 2) збереження свіжості фруктів, ягід та овочів; 3) обробка зернової сировини під час сушіння озоноповітряною сумішшю.

Ключові слова: озон; озонні технології; рослинництво; фертигація, зберігання фруктів, ягід та овочів; сушіння зернової сировини.

SHCHERBATIUK TETIANA

Kyiv National University of Technology and Design

ANDREYEVA OLGA

Kyiv National University of Technologies and Design

APPLICATION OF OZONE TECHNOLOGIES IN CROP CULTIVATION

The agro-industrial complex is one of the most developing spheres of the economy. Growing needs for food, new ways of tilling fields, storing seeds and finished agricultural products lead to the emergence of technological industries, the success of which is largely determined by a combination of classical standardized approaches and innovative search methods. Often the sources of new methods are found in areas of knowledge or areas of practical application of parallel scientific disciplines. Wide and pervasive use of ozone technologies in general ozone therapy and also in particular preventive and clinical medicine for a hundred years has become one of the key markers of interest in the use of ozone in various spheres of the economy, including in the agro-industrial complex. The paper shows a brief overview of works published in the last three years in peer-reviewed editions, devoted to the results of the use of ozone in crop production. Three areas of use of this reagent are analyzed: first of all, reducing the concentration of fungicide, increasing the growth and quality of vegetable crops using fertigation; secondly, preserving the freshness of fruits, berries and vegetables; thirdly, processing of grain raw materials during drying with an ozone-air mixture. Despite certain successes in the use of ozone in the agro-industrial field, the mechanisms at the level of genetic, biochemical and physiological processes of plants remain poorly understood, and it is this knowledge that will make it possible to regulate plant metabolism and develop standardized regimes for the use of ozone technologies in crop production. Taking into account the expected synergy between agronomic science and post-genomic technologies, it is possible to predict qualitatively new explanations for the action of ozone through the mechanisms of regulation of the soil and plant microbiome. Ukrainian manufacturers of ozone generators, agrarian scientists and agro-industrialists have every reason to unite to significantly raise the scientific and practical level of applying ozone technologies in agriculture. Now is the time for transformation, modernization, and therefore a hopeful future.

Key words: ozone; ozone technologies; crop production, fertilization; storage of fruits, berries and vegetables; drying of grain raw materials

Постановка проблеми у загальному вигляді**та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Агропромисловий комплекс є однією із сфер економіки, що найбільш розвиваються. Зростаючі потреби у харчуванні, нових способах обробки полів, зберігання насіння та готових сільгосппродуктів призводять до появи технологічних виробництв, успіх яких багато в чому визначається поєднанням класичних стандартизованих підходів та інноваційних пошукових методів. До останніх, на наш погляд, належать озонні технології, огляд застосування яких у рослинництві і став метою даної роботи.

Озон (O_3) уявляє собою триатомний газ у вигляді алотропної форми кисню з характерним різким запахом. При температурі $-112\text{ }^\circ\text{C}$ відбувається конденсація озону з утворенням темно-синьої рідини з вибуховими властивостями. Фізичні та хімічні властивості озону ґрунтовно описані у книзі Разумовського С. Д. та Заїкова Г. Е. «Озон та його реакції з органічними сполуками» (1974 р.), а деякі підсумовані в огляді колективу авторів з Великої Британії та США [1].

Озон менш стабільний, ніж атмосферний кисень; він швидко розкладається на кисень як у повітрі, так і у воді, з окиснювальним потенціалом 2,07 В, причому швидкість розкладання озону в розчині у 5-8 разів більша, ніж у газовій фазі. Ця нестабільність свідчить про те, що озон не накопичується й повинен генеруватися на вимогу через систему генерації озону [1]. Відомо, що висока окиснювальна здатність та швидке розкладання робить його ефективним проти широкого спектру мікроорганізмів, звідси його поширене застосування для знезараження приміщень, матеріалів/поверхонь, продуктів харчування та води. Саме ці властивості ефективно застосовані німецькими фахівцями у військово-польовій хірургії під час Першої світової війни, що згодом визначило розвиток цілого напрямку в окиснювальній терапії – озонотерапії. Тому й не дивно, що у 1971 р. у Німеччині було створено медичне товариство озонотерапевтів [2].

Широке всепроникне застосування озонних технологій у профілактичній та клінічній медицині

протягом ста років стало одним із ключових маркерів інтересу використання озону у різних сферах економіки, у тому числі в агропромисловому комплексі.

Формулювання цілей статті

До уваги читачів пропонується стислий огляд опублікованих за останні три роки у рецензованих виданнях робіт, присвячених результатам застосування озону у рослинництві.

Виклад основного матеріалу

У 2022 р. група вчених з Іспанії, країни, що входить до групи лідерів найбільших виробників томатів, дійшла висновку, що використання розчиненого озону за допомогою фертигації може дати кілька переваг для зростання та якості овочевої культури томату *Solanum lycopersicum* L [3]. Автори застосували безперервне зрошення та переривчасте зрошення озонованою водою у тепличних умовах. Озон генерувався з атмосферного повітря і в кінцевому підсумку вводився у фільтровану поливну воду доти, доки не було досягнуто окиснювально-відновного потенціалу 800-850 мВ. Оцінювалися дві агрономічні обробки: безперервне краплинне зрошення озонованою водою та краплинне зрошення озонованою водою, яке застосовувалося лише двічі. Проби ґрунту були взяті в три періоди, що відповідають передзбиральному періоду, початку збору врожаю та закінченню збору врожаю. Якість плодів оцінювали під час збирання врожаю. В цілому, застосовувані обробки незначно вплинули на фізико-хімічні властивості ґрунту, тільки рН ґрунту був значно знижений за рахунок безперервного зрошення озонованою водою наприкінці аналізу. Біомаси грамнегативних бактерій та грибів знижувалися при періодичному та безперервному зрошенні озонованою водою відповідно. Однак, на різноманітність, структуру та склад ґрунтової мікробної спільноти озоні обробки не вплинули, що свідчить про екологічність вибраних умов озонування. Зміни властивостей ґрунту незначно вплинули на фізіологію рослин томату, але не вплинули на врожайність та якість плодів. Устична провідність знижувалась, а власна ефективність використання води збільшувалась при безперервному зрошенні озонованою водою. На підставі одержаних результатів автори зробили висновок, що обробка озонованою водою має бути скоригованою відповідно до видів рослин та певних умов для виключення несприятливого впливу на врожай, збереження здоров'я та родючості ґрунту для стійкого управління врожайністю.

Інтернаціональний колектив з Іспанії та Еквадору у 2022 р. повідомив про результати дослідження фізіологічних та харчових реакцій рослин томатів із застосуванням озону [4]. Було встановлено, що при збільшенні концентрації озону у рослин томатів зменшується площа листя та збільшується загальна суха маса та концентрація пігментів, досягаючи максимуму при дозі 0,36 мг/л. Фертигація поживним розчином збільшує концентрацію азоту, фосфору та калію в листях, а також загальну екстракцію цих поживних речовин рослинами томатів. Автори виявили специфічну тенденцію розподілу та накопичення залежно від досліджуваного нутрієнта. Цікаво, що обробка озonom збільшила концентрацію калію в листях, не змінила загального вмісту азоту та фосфору, але зменшила загальну кількість калію. У рослин томатів, що росли при підвищенні концентрації озону, фосфору та калію, листя збільшувалося, але загальна екстракція азоту, фосфору та калію рослинами та їх розподіл між органами чіткої тенденції не мали. І хоча автори не дали змогу ознайомитися з обґрунтуванням обраних умов озонування води, проте, безперечним і обнадійливим є їхнє розуміння необхідності довгострокових експериментів із різними культурами. До того ж, у майбутніх дослідженнях важливо враховувати потенційні зміни у структурі органічної речовини за рахунок окиснювального стресу рослин.

На наш погляд, при плануванні подальших досліджень важливо оцінити динаміку антиоксидантних компонентів рослини під час її росту та розвитку при звичайному зрошувальному режимі для того, щоб на основі цих даних визначити ефективні концентрації озону.

Група китайських дослідників провела порівняння ефективності впливу зрошення та розпилення озонованої води на розсаду томатів [5] і виявила, що зрошення озонованою водою значно покращує фізіологічні характеристики цієї розсади. На тлі дії озонованої води експресія генів антиоксидантних ферментів, синтез хлорофілу та поглинання азоту суттєво збільшувалися, а максимальний рівень експресії досягався через 12 годин після дії. Цей результат показав, що обробка води озonom може значно покращити стресостійкість розсади томатів. Зрошення озонованою водою збільшує вміст азоту в листях томатів і, вірогідно, сприятиме експресії генів, пов'язаних із синтезом хлорофілу, та генів, пов'язаних із поглинанням азоту, що корисно для покращення фотосинтетичної здатності та врожайності томатів. Враховуючи економіку та ефективність виробництва, автори наполягають на необхідності застосування встановленої ними оптимальної концентрації озону для барботування води. Важливо також взяти до уваги, що ефект зрошення озонованою водою виявився набагато кращим, ніж після обприскування листя [5].

Мексиканські вчені, які вважають застосування озону в агропромисловості екотехнологічним, економічно ефективним і дуже перспективним для використання в країнах Латинської Америки, що розвиваються [6], у 2021 р. опублікували результати десятирічного досвіду використання озонних технологій для забезпечення якості деяких рослин, що широко культивуються у даному регіоні. Так, повідомляється, що озон продемонстрував свою корисність для керування післязбиральною обробкою таких фруктів, як манго та папайя [7]. Використання озону для поливу культур *Nopal opuntia* кактуса-опунції виявилось дуже ефективним для боротьби з хворобами та підвищення здоров'я рослин. Запропонована авторами система зрошення озonom запобігає зростанню кількості бактерій та жуків на цитрусових деревах. Використання озонованої води дозволило не лише підвищити врожайність цукрової тростини, а й поступово

зменшити концентрацію фунгіциду, зберігаючи виражені фунгіцидні властивості у міру того, як кількість озонуваної води підвищувалася.

На практиці озон часто використовується у якості фунгіциду для збереження свіжості фруктів та овочів. Колектив китайських вчених дослідив вплив концентрації озону на післязбиральну якість столового сорту винограду Мускат гамбурзький. Було проведено оцінювання наступних показників: швидкість виробництва етилену, інтенсивність дихання, вміст розчинних сухих речовин, кислотність, твердість, швидкість обмолоту, загальна кількість дріжджів і плісняви, а також активність ферментів супероксиддисмутази, пероксидази, каталази, поліфенолоксидази та фенілаланіну. На поверхні винограду визначили метагеном грибів [8]. Було встановлено, що обробка озonom (14,98 мг озону/м³) позитивно впливає на збереження винограду. Через 80 днів зберігання вміст розчинних сухих речовин і кислотність збільшилися на 3,1 і 0,03 % відповідно. За цей же період також збільшилася жорсткість, але знизилася швидкість обмолоту. За розроблених умов зберігання інгібувалася активність поліфенолоксидази й збереглася активність супероксиддисмутази, пероксидази, каталази та фенілаланінаміакліази, що затримувало старіння винограду та зберігало його свіжість. Крім того, було виявлено, що озон може змінити структуру грибкової спільноти на поверхні винограду та зменшити різноманітність грибів, зменшуючи тим самим виникнення хвороб. Однак, на думку авторів, молекулярний механізм стійкості винограду до патогенів у присутності озону потребує вивчення.

У роботі інших китайських вчених [9] показано, що обробка озonom дині після збирання врожаю значно пригнічує вільнорадикальний стрес за рахунок підвищення рівня транскрипції всіх видів супероксиддисмутази: Cu/Zn-COD, Fe-COD, Mn-SOD. Було виявлено, що обробка озonom не лише уповільнює розкладання дині після збирання врожаю, а й покращує її якість під час зберігання у холодильнику. На основі транскриптомного аналізу динної шкірки та м'якоті автори встановили, що обробка озonom може підтримувати твердість дині за рахунок зміни метаболітів пектину та зниження вироблення етилену внаслідок регулювання відповідних генів, особливо у шкірці. Зміна загального вмісту флавоноїдів у шкірці та м'якоті пов'язана з регуляцією фенілаланін-аміакліази, 4-кумарат-КоА-лігази та генів родини P450, що у подальшому призводить до інгібування шляху метаболізму фенілаланіну у шкірці та сприяє стимулюванню вторинного метаболізму у м'якоті.

Наведений вище алгоритм дослідження був застосований у роботі [10], у якій вивчили вплив обробки озonom на фізіологічні характеристики, активний кисневий обмін та антиоксидантні властивості післязбиральної полуниці. Результати показали, що втрата ваги та частота дихання полуниці пригнічувалися обробкою озonom, тоді як зниження твердості та загального вмісту розчинних сухих речовин затримувалося. Озон знижував швидкість генерації супероксид-аніонів-радикалів, підвищував активність супероксиддисмутази, каталази, аскорбатпероксидази та монодегідроаскорбатредуктази, а також сприяв накопиченню аскорбінової кислоти, відновленого глутатіону та відновлювальної/антиоксидантної здатності заліза. Таким чином, автори пояснили поліпшення антиоксидантної здатності післязбиральної полуниці, обробленої озonom, за рахунок посилення активності антиоксидантних ферментів і збільшення експресії антиоксидантних білків, пов'язаних із системою «аскорбінова кислота – глутатіон».

Вчені з Жешувського університету у Польщі почали активно досліджувати вплив озону на обробку різних ягід під час їх зберігання. Kuźniar P. та ін. проаналізували вплив застосування озону в концентрації 10 ppm протягом 15 та 30 хвилин на механічні та хімічні властивості, а також мікробіологічну стабільність трьох сортів червоної смородини (*Ribes rubrum L.*), вирощених органічними методами. Плоди, зібрані в момент дозрівання врожаю, мали значно більші діаметр і вагу та менший вміст води порівняно із плодами, зібраними на сім днів раніше. При цьому процес озонування, незалежно від дати збору ягід, зменшував аналізовані фізичні параметри. Вміст аскорбінової кислоти в озонуваних плодах варіював, при цьому найбільше зниження спостерігалось для фруктів, що були зібрані за 7 днів до оптимальної дати збирання врожаю і зберігалися протягом 15 днів у холодильнику (середнє зниження на 13,31 % порівняно з контрольними фруктами без озонування). Загалом процес озонування справив позитивний вплив на зміну антиоксидантної активності фруктів: найвищі середні значення були отримані для фруктів, що були зібрані за 7 днів до оптимальної дати збирання врожаю та зберігалися протягом 15 днів в умовах охолодження; крім того, озон також вплинув на зниження розвитку мікроорганізмів, у тому числі мезофільних аеробних бактерій, дріжджів та плісневих грибів, головним чином на сорті смородини «Лосан» [11].

Gorzelań J., Kapusta I. та ін., провівши фізико-хімічні дослідження в озонуваних та неозонуваних зразках Ірги вільхольістої *Amelanchier alnifolia Nutt* після безпосереднього заморожування та зберігання у морозильній камері (-18 °C), дійшли висновку, що процес озонування справив позитивний вплив на зниження мікробного навантаження плодів ягід на 7-й день холодного зберігання, включаючи значне зниження кількості аеробних мезофільних бактерій, дріжджів та плісняви, а також зниження кислотності плодів. Вміст аскорбінової кислоти та антиоксидантна активність у плодах ягід варіювали залежно від тестованого сорту та клону, а також часу впливу озону [12].

Італійський фізіолог Velio Voci (1928–2019 pp.), якого по праву вважають лідером фундаментальної озонотерапії, довгі роки свого плідного життя працював в Університеті Сієни, де певною мірою пролив світло на механізми озону в організмі людини, багато в чому визначив розвиток озонотерпії в Європі та світі, а також поширення інформації про озонні технології. У 2021 р. вчені Тосканського університету опублікували повноважний огляд, що містив понад сто джерел і був присвячений проблемі

зберігання свіжонарізаних продуктів, вживання яких останніми роками стає все більш популярним [13].

Процеси різання, очищення та упаковки, а також біохімічні, сенсорні та мікробні зміни, що відбуваються на поверхні тканин рослин, можуть прискорити псування останніх. У цьому відношенні біологічне зараження може бути первинним. Це має місце тоді, коли інфекційні організми безпосередньо заражають сировину та/або перехресним зараженням, яке відбувається під час процесів приготування їжі, наприклад, миття. Порівнюючи низку технологій, що дозволяють продовжити термін зберігання свіжонарізаних продуктів, автори [14] приводять доводи того, що озонна технологія є високоефективною стерилізацією, а також докладно розглядають основні дослідження, присвячені впливу газоподібного озону та озонаної води на зростання мікробів та збереження якості свіжозрізаних фруктів та овочів.

На особливу увагу заслуговує робота Присяжнюка Д. В. із співробітниками [15], у якій повідомляється, що для високоякісного сушіння зернової сировини із одночасним зниженням споживаних енерговитрат спроектовано та виготовлено дослідну модель віброозонуючого комплексу, де оброблюваний матеріал піддається вібраційному впливу, який збільшує та оновлює поверхню теплообміну. В результаті цього відбувається інтенсивне видалення вологи, прискорюється сушіння. Процес сушіння відбувається рівномірно по всьому шару, не викликаючи місцеве перегрівання матеріалу. У роботі наведено методіку визначення дози обробки зернової сировини під час сушіння озоноповітряною сумішшю з використанням розробленої моделі, це забезпечуватиме ефективне виконання технологічного процесу із одночасним зниженням енерговитрат. Хімічний склад зерна різноманітних сільськогосподарських культур відрізняється незначно. З цього випливає, що дія обробки озоном для різноманітних культур описується загальними параметрами та підпорядковується загальним закономірностям. Отримані залежності дають змогу визначити дозу обробки зернової сировини озоноповітряною сумішшю, яка, наприклад, для 1 кг зерна кукурудзи становить приблизно 0,06 м³, пшениці – 0,045 м³; при цьому доза озону на 1 кг зерна кукурудзи складає 1,91, а пшениці – 1,44 мг. Ефективність обробки озоноповітряною сумішшю різної зернової сировини залежатиме від її морфологічних особливостей, а саме, від геометричних розмірів зернин.

Висновки з даного дослідження

На підставі огляду літератури за останні три роки встановлено переваги використання озонних технологій лише для однієї галузі агропромислового комплексу – рослинництва. Вони полягають у тому, що дають змогу підвищити врожайність культурних рослин. Ефективність цих технологій автори пояснюють, насамперед, фунгіцидними та бактерицидними властивостями озону, які дають змогу поступово зменшити концентрацію фунгіциду. Однак, враховуючи очікувану синергію між агрономічною наукою та постгенетичними технологіями, можна прогнозувати якісно нові пояснення дії озону через механізми регулювання мікробіома ґрунту та рослин.

Останнім часом все більшого поширення набуває дослідження впливу озону на післязбиральну якість ягід, фруктів та овочів як підготовку до заморожування для тривалого зберігання. Великий інтерес має як технічне, так і практичне рішення обробки зернової сировини під час сушіння озоноповітряною сумішшю.

Незважаючи на певні успіхи озонних технологій в агропромисловій галузі, залишаються мало вивченими механізми на рівні молекулярно-генетичних, біохімічних та фізіологічних процесів, що відбуваються у рослинах, але ж саме ці знання дозволять регулювати метаболізм рослин та розробляти стандартизовані режими використання озону у рослинництві.

Перспективи подальших досліджень

Суворі виклики дійсності багато чому навчили: карантин – роботі он-лайн, що дозволить створити мережу зацікавлених наукових колективів, між якими можна розподілити завдання відповідно до їх науково-технічного потенціалу; війна – здатність об'єднуватись як у великому, так і малому. Українські виробники генераторів озону, вчені-аграрії та агропромисловці мають усі підстави, об'єднавшись, істотно підняти науково-практичний рівень застосування озонних технологій у сільському господарстві. Зараз час для трансформації, модернізації, а, отже, до обнадійливого майбутнього.

Література

1. Epelle E., Macfarlane A., Cusack M. Ozone application in different industries: A review of recent developments. *Chemical Engineering Journal*. 2023. №454.
2. Institute of ozone therapy and medical equipment. <http://www.medozone.com.ua/istoria/22-istoriya-razvitiya-ozonoterapii.html>.
3. Díaz-López M., Siles J. A., Ros C. The effects of ozone treatments on the agro-physiological parameters of tomato plants and the soil microbial community. *Science of the Total Environment*. 2022. № 812.
4. Ruiz-Espin A., Garcia-Caparros P., Llanderal A. Physiological and nutritional responses to ozone application in tomato seedling plants. *Agriculture*. 2023. № 13(1).
5. Xu JP., Yu YC., Zhang T. Effects of ozone water irrigation and spraying on physiological characteristics and gene expression of tomato seedlings. *Hortic Res*. 2021. №8 (180).
6. Enriquez-Castro C., Perez-Nafarrate M., Rodriguez J. E. G. Innovation in food products using ozone technology: impact on quality assurance. *Innovation in the Food Sector Through the Valorization of Food and Agro-Food By-Products*. 2021.

7. Mohanapriya R., Vijay Aravinth K. Role of ozone in food industry and agriculture. *The Indian Journal of Nutrition and Dietetics*. 2022. № 59. C. 232–249.
8. Cong-cong Gao, Qi Lin, Cheng-hu Dong Effects of ozone concentration on the postharvest quality and microbial diversity of Muscat Hamburg grapes. *RSC Adv*. 2020. №10. C. 9037-9045.
9. Zhang H., Zhang X., Dong C. Effects of ozone treatment on SOD activity and genes in postharvest cantaloupe. *RSC Adv*. 2020. № 5; 10(30). P. 17452-17460.
10. Zhang X., Tang N., Zhang H. Comparative transcriptomic analysis of cantaloupe melon under cold storage with ozone treatment. *Food Res Int*. 2021. 2 (140).
11. Zhang H., Li K., Zhang X. Effects of ozone treatment on the antioxidant capacity of postharvest strawberry. *RSC Adv*. 2020. № 5;10(63). P. 38142-38157.
12. Kuźniar P., Belcar J., Zardzewiały M. Effect of ozonation on the mechanical, chemical, and microbiological properties of organically grown red currant (*Ribes rubrum* L.). *J. Fruit. Molecules*. 2022. № 25;27(23). P. 8231.
13. Gorzelany J., Kapusta I., Zardzewiały M. Effects of ozone application on microbiological stability and content of sugars and bioactive compounds in the fruit of the saskatoon berry (*Amelanchier alnifolia* Nutt.). *Molecules*. 2022. № 30;27(19). P 6446.
14. Botondi R., Barone M. Review into the effectiveness of ozone technology for improving the safety and preserving the quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Foods*. 2021. № 10, P. 748.
15. Prysiazhniuk D. V. Determination of the dose of progressing grain raw materials with ozone-air mixture during vibration drying. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2022. Issue 1(305). P. 224–227.