

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-338-353](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-338-353)

УДК 663.2:631.41:543.544:519.24

Олександр Сергійович Луканін¹, Наталія Борисівна Мельник²¹доктор технічних наук, професор, академік НААН

Національна академія аграрних наук України (Київ, Україна)

E-mail: 0752las@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7786-5942>²провідний фахівець відділу охорони ландшафтів, збереження біорізноманіття і природозаповідання

Інститут агроєкології і природокористування НААН (Київ, Україна)

E-mail: 17natasha17@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1667-6780>

КОРЕЛЯЦІЇ ВПЛИВУ ҐРУНТУ ТА ІНШИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ЯБЛУЧНИХ ДИСТИЛЯТІВ

У статті представлено результати міждисциплінарного дослідження впливу агрохімічних характеристик ґрунту на ароматичний профіль яблучних дистилятів, виготовлених із сорту Айдаред у чотирьох регіонах України. Дослідження включало повний цикл виробництва яблучного дистиляту, що охоплював агрохімічний аналіз ґрунтів (визначення рН, вмісту гумусу, азоту, фосфору, калію), збір плодів сорту Айдаред, оцінку якості соку, ферментацію з використанням трьох рас дріжджів («Сидрова 101», «Яблучна 7», дика мікрофлора). На завершальному етапі здійснювався газохроматографічний аналіз дистилятів з метою визначення концентрацій летких сполук, що формують ароматичний профіль продукту.

Ключові слова: плодові дистиляти; ґрунт; леткі сполуки; азот; калій; фосфор; айдаред.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. В умовах активного розвитку галузі виробництва плодових дистилятів в Україні, зокрема яблучних, залишається відкритим питання забезпечення високої якості продукції, яка використовується для виробництва плодових дистилятів з яблук. Одним із ключових факторів, що визначають ароматичний профіль алкогольних напоїв, є ґрунт – сукупність ґрунтово-кліматичних умов регіону вирощування сировини. Однак у науковій літературі спостерігається дефіцит системних досліджень, присвячених вивченню впливу агрохімічних характеристик ґрунту на летких сполук, які формують ароматичну складову яблучних дистилятів.

У більшості наукових праць увага акцентується на сортових особливостях плодів, технологічних параметрах ферментації або впливі рас дріжджів, при цьому взаємозв'язок між агрохімічним складом ґрунтів та сенсорними властивостями кінцевого продукту залишається недостатньо вивченим. Відсутність такої інформації обмежує можливості прогнозованого управління якістю дистилятів та ускладнює створення ґрунтоорієнтованих продуктів із виразною регіональною ідентичністю.

У зв'язку з цим, дослідження, спрямоване на встановлення статистично значущих кореляцій між вмістом гумусу, макроелементів (азоту, фосфору, калію), кислотністю ґрунту (рН) та концентраціями ключових ароматичних компонентів (естери, вищі спирти, альдегіди) з різних регіонів України, що є науково обґрунтованим і практично важливим. Його результати можуть бути використані як основа для агротехнологічного планування садівничого виробництва, а також для розвитку географічно маркованих алкогольних брендів в Україні.

Постановка проблеми. Вирішальну роль у формуванні смаку та аромату у дистилятах залежить від складу ґрунту. На родючість ґрунту та врожайність сільськогосподарських культур впливають біологічні процеси, а на ці процеси, включаючи активність ферментів, впливає рН [1].

Кислотність і лужність ґрунту (рН) мають значний вплив на ріст і розвиток рослин. З цього процесу це в основному відображається у впливі клімату та елементів ґрунту на ріст рослин, тоді як клімат в основному впливає на вуглець, водень і кисень, які становлять 96 % в атмосфері. Більш важливими елементами в ґрунті є азот, фосфор і калій, а вторинними елементами є кальцій, магній, сірка тощо [2].

Ґрунт визнано ключовим чинником, від якого залежить кінцева якість сільськогосподарської продукції. Вивчення ролі ґрунтів у виноградному виноробстві в різних країнах ретельно проведено в останні десятиліття, що дає позитивні результати у виробництві конкурентоспроможних вин та брендів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі багато уваги приділяється ролі ґрунтових умов для врожайності яблунь. Для оптимального фотосинтезу яблунь на ґрунтах, що лежать на муловому покриві, вологість ґрунту повинна становити 60-86 % від найнижчої вологоємності, на інших ґрунтах – 60...90 % від польової вологоємності у шарі 0...60 см. Помірний полив яблуні до вологості 50...70 % від польової вологоємності ґрунту забезпечував найвищу якість плодів; дефіцит води у ґрунті спричиняв утворення дрібних яблук з вищим вмістом аскорбінової кислоти, поліфенолів і сухих речовин. При проєктуванні садів важливо мати дані про вологість ґрунту.

Найактивніше споживання елементів живлення кореневою системою яблуні відбувалося в ґрунтовому шарі на глибині 40...60 см. У цей період засвоювалися такі елементи як N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu та Zn. У міжнародних дослідженнях, зокрема в США, Китаї, Індії, Латвії та Новій Зеландії, встановлено, що цей шар ґрунту є критичним для поглинання поживних речовин корінням яблуні. Зростання вмісту фосфору спочатку спостерігається у листках і лише потім - у плодах, що супроводжується збільшенням урожайності до 20 %. Ефективність функціонування кореневої системи тісно пов'язана зі структурою ґрунту: на цілих більш родючих землях урожайність яблук у кілька разів вища, ніж на ґрунтах, виснажених попередніми монокультурами.

У 2019 китайські науковці Yanbing Qi, Rui Wang, Qianru Qin & Quan Sun опублікували статтю «*Soil affected the variations in grape and wine properties along the eastern foot of Helan Mountain*», China [3]. Вони досліджували чотири виноградники в межах однієї кліматичної зони, де посаджено виноград сорту Каберне Совіньйон 4-річного віку. Були відібрані зразки для дослідження відмінностей у властивостях винограду і вина. Результати показали, що виноград виноградника Лілан мали вищий вміст цукру та цукор-кислотне співвідношення, ніж Huida, Yuquan та Zhihuiyuanshi. Відповідно, виноград з виноградника Zhihuiyuanshi мав найвищий вміст танінів і загальних фенолів. Що стосується вин, то вино з виноградників Юцюань мало низький pH, але витримувався добре потенціал, і вино виноградника Zhihuiyuanshi мало найвищий тон, кольоровість, таніни, загальні феноли і вміст алкоголю, ніж в інших виноградниках. pH ґрунту позитивно корелює з антоціанами винограду і негативно корелював із загальною кислотністю у вині. Вуглець мікробної біомаси (МБС) корелювали з антоціанами у винограді.

Вміст вуглецю в мікробній біомасі (МБС) позитивно корелював із вмістом антоціанів у винограді. У свою чергу, азот мікробної біомаси (МБН) виявив позитивну залежність від рівня розчинних сухих речовин у винограді, а також був пов'язаний із підвищеним вмістом танінів і загальних фенольних сполук у вині.

Сучасне дослідження Amoah-Antwi et al., 2022 «*Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality*» свідчить, що гумусові кислоти мають критичне значення для стабілізації структури ґрунту, підтримки катіонного обміну та покращення водно-повітряного режиму. Робота Amoah-Antwi та співавт. (2022) наголошує, що внесення органічних матеріалів здатне істотно змінювати структурну організацію гумусових сполук, що, у свою чергу, впливає на мікробну активність і ферментативні процеси. Водночас у науковому дискурсі досі недостатньо висвітлено, як подібні зміни структури органічної речовини ґрунту впливають на вторинний метаболізм рослин та біосинтез ароматичних компонентів у дистилятах. Відтак, вивчення кореляції між концентрацією гумусу та леткими сполуками в спиртах відкриває нові перспективи для цілеспрямованого контролю якості фруктових сировини [4].

Дослідження Sauze et al., 2018 «*The role of soil pH on soil carbonic anhydrase activity*» встановлює фундаментальну роль pH ґрунту у регуляції активності ферментів, зокрема карбонатної ангідрози, яка бере участь у вуглецевому циклі. Однак у контексті фруктових культур та їхньої подальшої спиртової переробки недостатньо вивченим залишається зв'язок між

кислотно-лужним балансом ґрунту та синтезом ароматичних компонентів у процесі ферментації. Таким чином, подальше дослідження кореляцій між рН ґрунту та профілем летких сполук у дистилятах дає змогу деталізувати біохімічні наслідки впливу теруару [5].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність ґрунтової кількості досліджень, присвячених якості фруктових дистилятів, більшість із них зосереджується на технологічних аспектах переробки сировини, виборі дріжджових культур або впливі процесів витримки. Натомість початковий вплив теруару – зокрема агрохімічних параметрів ґрунтів – на формування ароматичного профілю плодового дистиляту залишається недостатньо вивченим, особливо в контексті яблучної сировини. Переважна частина наукових праць або узагальнює роль ґрунтових характеристик, або не включає їх до комплексного хімічного аналізу кінцевого продукту.

До цього часу не було проведено глибокого порівняльного аналізу взаємозв'язків між рН, вмістом гумусу, макроелементами (азотом, фосфором, калієм) та концентраціями летких компонентів яблучних дистилятів, зокрема таких важливих ароматичних сполук як ацетальдегід, естери та вищі спирти. Також бракувало системних досліджень, що враховують регіональні відмінності ґрунтів і застосовують різні раси дріжджів у ферментації тієї самої сировини.

Існує чимало прикладів, що демонструють вплив мінеральних речовин, органічних добрив та агротехнічних заходів на урожайність яблуні. Проте даних щодо математичної залежності між конкретними показниками ґрунту та врожайністю недостатньо. Саме тому метою дослідження було визначити кореляційні зв'язки між основними ґрунтовими характеристиками та урожайністю яблунь на слабкорослих підщепах.

Це дослідження має на меті з'ясувати конкретні кореляції між ключовими параметрами ґрунту та хімічним профілем яблучних дистилятів, пропонуючи глибше розуміння ефекту теруару в цій спеціалізованій галузі сільського господарства. Таким чином, дана стаття покликана заповнити цю прогалину шляхом проведення багатофакторного дослідження, яке інтегрує агрохімічні параметри, технологічні етапи виробництва та хімічний аналіз ароматичних сполук дистиляту з яблук сорту Айдаред, вирощених у чотирьох агрогеографічних зонах України.

Мета дослідження. Метою дослідження є встановлення та кількісна оцінка кореляцій між агрохімічними параметрами ґрунту (рН, вміст гумусу, азоту, фосфору та калію) та концентрацією основних летких сполук (ацетальдегід, метанол, естери, вищі спирти, кислоти) у яблучних дистилятах, виготовлених із сорту Айдаред. Дослідження спрямоване на виявлення закономірностей, які визначають формування ароматичного профілю дистиляту залежно від теруару, з урахуванням географічного положення, складу ґрунту та особливостей ферментації.

Виклад основного матеріалу.

Методи досліджень. Хімічні та органолептичні показники об'єктів досліджень визначали за загальноприйнятими та спеціальними методиками технохімічного контролю у садівництві, консервній та виноробній промисловостях. Відбір яблук для аналізу проводили згідно з Програмою і методикою сортовивчення плодових, ягідних та горіхоплідних культур. Відбір проб для аналізів соків, сидрових матеріалів та ін. проводили згідно з ГОСТ 14137–74. Підготовку проб для визначення масової концентрації металів проводили згідно з ГОСТ 26929–94.

Дослідження проводили за такою схемою:

1. Проведення технологічної оцінки сировини для виробництва плодових дистилятів.
2. Технологічну оцінку сортів яблук для виробництва сидрів та їх класифікацію проводили згідно з вимогами до сировини для виробництва сидру у світі (за хімічним складом – масовою концентрацією кислот, фенольних речовин та цукрів).

Технологічну оцінку гібридних форм яблук, кребів (напівкультурних сортів яблук) та видів *Malus* на придатність для використання у селекції вітчизняних сидрових сортів яблук також проводили згідно з вимогами до сировини для виробництва у світі.

Фізико-хімічні показники визначали за методами:

- масову частку сухих розчинних речовин – згідно з ДСТУ ISO 751-2004;
- масову концентрацію відновлюваних (редуючих) цукрів – згідно з ДСТУ 4954:2008;
- масову концентрацію титрованих кислот (у перерахунку на яблучну) – згідно з ДСТУ 4957:2008;
- масову концентрацію фенольних речовин – згідно з ДСТУ 4112.41:2003 та згідно з перманганатометричним методом Левентал-Нейбауера, модифікованим на дослідній станції у м. Лонг Аштон (Англія).

Проведення аналізу передбачає титрування 1 мл зразка соку свіжим розчином 0,025 н KMnO_4 у присутності 5 мл розчину свіжого індикатору індигокарміну до зеленого кольору і потім від однієї краплі до жовтого. Приготування розчинів: розчин 0,025 н KMnO_4 готують перед аналізом розведенням 0,1 н розчину KMnO_4 в 4 рази; розчин індикатору індигокарміну – 1 г порошку індигокарміну розчиняють у воді з 50 мл H_2SO_4 концентрованого, об'єм розчину доводять до 1 л, кожного разу перед аналізом розбавляють розчин так, щоб на титрування 5 мл індикатору індигокарміну використовувалось точно 1 мл свіжого розчину 0,025 н KMnO_4 . Розрахунок за формулою:

$$X = A - 1, \text{ г/дм}^3 \text{ або } X = (A - 1) / 10, \%, \quad (1)$$

де x – загальна масова концентрація фенольних речовин, %, A – кількість 0,025 н KMnO_4 , який пішов на титрування зразка, мл, 1 – кількість 0,025 н KMnO_4 , який пішов на титрування індикатору індигокарміну, мл, 10 – перерахунок у %;

- об'ємну частку етилового спирту – згідно з ДСТУ 4181:2003,;
- активну кислотність (рН) – потенціометричним методом за допомогою рН-метру «Іономір І-130»;
- масову концентрацію летких кислот – згідно з ДСТУ ГОСТ 13191:2009;
- масову концентрацію іонів металів – методом атомно-абсорбційної спектроскопії згідно з ГОСТ 30178–96; ДСТУ 7670:2014.
- стабільність сидрових матеріалів визначали за допомогою тесту на схильність до незворотних колоїдних помутнень (традиційний тест));
- органолептичну оцінку сидрових матеріалів та сидрів – дегустацією за, відповідно, 8-ми та 10-бальною системами.

Методи визначення якості ґрунту:

- Відбір проб ґрунтів здійснювали згідно з ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб»
- Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова;
- Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Мачигіна;
- Методи визначення валового фосфору і валового калію в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського;
- Визначання рухомих сполук фосфору і калію за методом Кірсанова в модифікації ННЦ ІГА;
- Визначання рухомих сполук калію за методом Маслової в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського.

Місця дослідження та збір зразків. Дослідження проводилося в чотирьох різних географічних локаціях України: Сокиряни, Жорнище, Шура та Суми. Ці місця були обрані для представлення різних ґрунтово-кліматичних умов. Вибір сорту Айдаред відбувся шляхом порівняння і порівняння вирощування сортів у різних зонах. Зразки яблук збирали щорічно протягом 3 років, та місцевий дикий сорт яблук, вирощений за

стандартними сільськогосподарськими практиками, відповідними для кожного регіону. У процесі ферментації застосовували три різні варіанти дріжджової мікрофлори: два штами з локальними назвами – «Сидорова 101» та «Яблучна 7», а також природну (дику сформовану) мікрофлору, характерну для відповідних регіонів. Конкретна видова класифікація дріжджів у межах цього дослідження не проводилась.

Аналіз дистилятів.

Аромат є атрибутом якості яблук, що складається не лише з одного критичного компонента, а складної суміші летких речовин, яка залежить від летких сполук, їх концентрацій та порогових значень запаху. Нині у яблуках ідентифіковано понад 300 летких речовин [6].

Більшість летких речовин класифікуються на естери (78-92 % від загальної кількості летких речовин), спирти (6-16 % від загальної кількості летких речовин), альдегіди та кетони [7]. Однак на склад і концентрацію летких речовин впливає багато факторів, включаючи стадію зрілості [8], умови зберігання [9], кліматичні умови та вплив теруару [10]. Наприклад, альдегіди домінують у незрілих яблуках. Однак концентрація альдегідів зменшується протягом періоду дозрівання яблук, тоді як основними летючими речовинами стають естери та спирти, концентрація яких зростає [11]. Крім того, сорт яблук є ще одним ключовим фактором, який має великий вплив на вміст летких речовин. Дослідження різних сортів виявили багато відмінностей як за складом, так і за концентрацією летких речовин [12].

Із зібраних плодів були виготовлені яблучні дистиляти з використанням єдиних протоколів ферментації та дистиляції, щоб мінімізувати процедурну мінливість. Отримані спирти були проаналізовані на вміст п'яти основних летких сполук:

Ацетальдегід: поширений альдегід, що впливає на свіжі, зелені або гострі нотки. Аналіз ацетальдегіду дає змогу відстежити якість ферментаційного процесу та вплив ґрунтових умов на інтенсивність біохімічного перетворення вуглеводів у яблучній сировині.

Метанол: токсичний спирт, який зазвичай присутній у незначних кількостях, рівень якого є вирішальним для безпеки та контролю якості. Метанол було включено до переліку аналізованих сполук як показник технологічної якості та безпеки яблучних дистилятів. Його утворення є типовим для продуктів ферментації, що базуються на фруктовій сировині з високим вмістом пектинів, зокрема яблук. Контроль за концентрацією метанолу дозволяє оцінити коректність процесів ферментації та дистиляції, а також гарантувати відповідність готового продукту санітарним нормам.

Естери: різноманітна група сполук, які переважно відповідають за фруктові та квіткові аромати. Їхня концентрація є сенсорним маркером якості дистиляту: надмірність – може призвести до різкого запаху, а дефіцит – до бідного аромату. Тому включення естерів до дослідження дозволяє оцінити органолептичний потенціал продукту, а також встановити зв'язок з ґрунтовими умовами та ферментаційним середовищем [13].

Вищі спирти: у межах дослідження було проаналізовано вміст основних представників вищих спиртів, які відіграють критичну роль у формуванні аромату та структури яблучного дистиляту. Зокрема, до них належать: ізоаміловий спирт (ізопентанол), н-пропанол, ізобутанол (ізобутиловий спирт), 1-бутанол та 1-гексанол. Загальна концентрація цих сполук була визначена як сума вищих спиртів. Ці компоненти складають основу сивушних олій, які при помірному вмісті сприяють повноті смаку та ароматичній насиченості напою, але за надлишкових концентрацій можуть обумовлювати небажані сенсорні відтінки.

Сивушні олії сприяють повноті та складності ароматичних нот, хоча в надлишку можуть призвести до небажаних сенсорних властивостей.

Органічні кислоти: сприяють загальній збалансованості та свіжості, а також діють як попередники етерифікації.

Аналіз ґрунту. У межах дослідження встановлено, що ґрунтово-кліматичні умови досліджуваних регіонів України – зокрема, Сокирянського району (Чернівецька обл.), с. Жорнище Іллінецького району та с. Шура Копіївська Тульчинського району (Вінницька обл.) і Сумської області – мають істотний вплив на метаболізм летких сполук у яблучній сировині. У цих зонах переважають ґрунти із середнім або підвищеним вмістом гумусу та азоту, що характерно для чорноземів та сірих лісових ґрунтів – типових для Лісостепу.

Зразки ґрунту були зібрані з яблуневих садів у кожному місці протягом одного і того ж трирічного періоду. Були визначені наступні критичні параметри ґрунту: рН – показник кислотності або лужності ґрунту, що впливає на доступність поживних речовин і мікробну активність:

1. Вміст гумусу (Гумус): Вміст органічної речовини, що свідчить про родючість ґрунту, його структуру та здатність утримувати воду.

2. Вміст азоту (N): Основний макроелемент, необхідний для росту рослин і синтезу білків.

3. Вміст фосфору (P): Необхідний макроелемент, що бере участь у передачі енергії та розвитку коренів.

4. Вміст калію (K): Важливий макроелемент для активації ферментів, регулювання водного балансу та якості плодів.

Результати дослідження. У системному вивченні якості плодового дистилляту важливим є не лише хімічний аналіз окремих стадій виробництва, а й встановлення причинно-наслідкових зв'язків між агрохімічними характеристиками сировини та кінцевим ароматичним профілем продукту. Такий підхід дозволяє виявити ключові фактори впливу, а також забезпечити керованість процесів на ранніх етапах (вибір ділянки, агротехніка, підбір дріжджів). Кореляційний аналіз у цьому дослідженні проведено для того, щоб виявити залежності між показниками ґрунту (рН, вміст гумусу, азоту, фосфору та калію), параметрами яблучного соку та концентраціями летких ароматичних сполук у дистиллятах. Це дало змогу оцінити, наскільки глибоко локальні ґрунтово-кліматичні особливості здатні впливати на хімічну природу напою навіть через кілька технологічних стадій – від соку до готового спирту.

Для встановлення залежності між агрохімічними характеристиками ґрунту та ароматичним профілем дистилляту було проведено кореляційний аналіз між вмістом гумусу в ґрунтах чотирьох регіонів дослідження: Зона 1 – Сокиряни, Зона 2 – Жорнище, Зона 3 – Шура, Зона 4 – Суми та концентраціями основних летких сполук, різних штамів дріжджів: Раса 1 – «Сидрова 101», Раса 2 – «Яблучна 7», Раса 3 – «Дикі» визначених у яблучних дистиллятах.

На графіку (рис. 1) представлено зв'язок між вмістом **гумусу** (%) та рівнями ацетальдегіду, метанолу, естерів, спиртів та кислот. На графіку подано усереднені значення для чотирьох агрогеографічних Зон та трьох Рас дріжджової мікрофлори, відповідно. Вважаємо, що підвищений вміст гумусу, сприяє кращому забезпеченню рослин доступними сполуками азоту та мікроелементами, що впливає на профіль амінокислот у яблуках, а отже – і на біосинтез ароматичних метаболітів під час бродіння.

Найвищу кореляцію з вмістом гумусу продемонстрував ацетальдегід у зразках, зброджених дріжджами «Дикі» (коефіцієнт $r = 0,903$), що свідчить про тісний зв'язок між органічним збагаченням ґрунту і біосинтезом альдегідів у процесі ферментації. Загалом, чим вищий вміст гумусу в ґрунті, тим вищі концентрації естерів, вищих спиртів і ацетальдегіду, що формують фруктовий аромат яблучного дистилляту. Це підтверджує гіпотезу про позитивний вплив ґрунту на сенсорний профіль готового продукту.

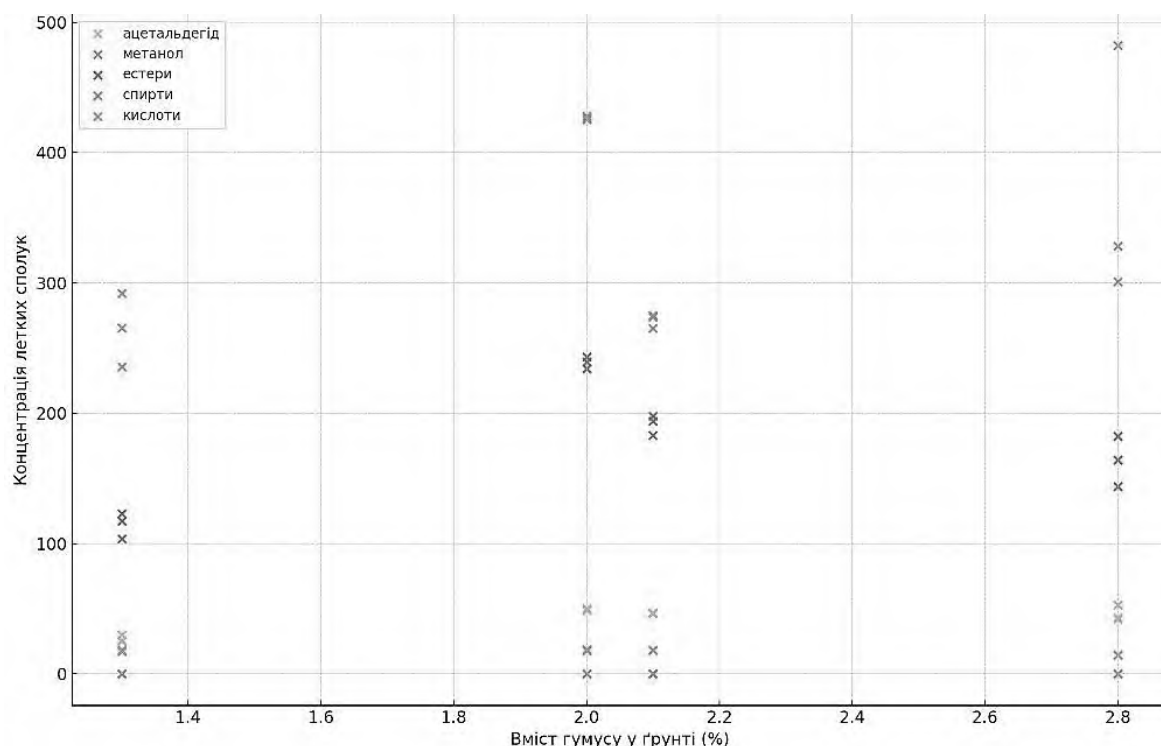


Рис. 1. Залежність концентрацій ацетальдегіду, метанолу, естерів, спиртів та кислот від вмісту гумусу в ґрунті

Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом дослідимо вплив рН ґрунту в досліджуваних зонах та концентраціями основних летких сполук, різних штамів дріжджів, визначених у яблучних дистилятах на формування летких компонентів дистиляту (рис. 2). Кореляція охоплює всі чотири зони та три раси дріжджів, відображаючи детальну картину впливу кислотності ґрунту на ароматичний профіль. Реакція ґрунтового середовища (рН) є важливим параметром, що впливає як на біодоступність макро- і мікроелементів, так і на метаболізм самої рослини, а згодом – і на характер ферментації.

Аналіз свідчить, що значення рН ґрунту знаходились у межах від 5,1 до 5,4, тобто в діапазоні слабокислого до нейтрального. Саме в цьому інтервалі відбувається оптимальне засвоєння макроелементів і прояв активності ґрунтових мікроорганізмів, що суттєво впливає на метаболізм рослин та дріжджів під час ферментації. Найсильніша кореляція зафіксована для ацетальдегіду, зброженого Расою 2 – «Яблучна 7» у Зоні 1 – Сокиряни: коефіцієнт $r = -0,843$, що вказує на сильний зворотний зв'язок. Тобто, зі зростанням рН знижується концентрація ацетальдегіду, що може бути пов'язано з регуляцією ферментативної активності альдегіддегідрогеназ у дріжджових клітинах.

Загалом, зі зростанням рН (від 5,1 до 5,4) тенденції змін різних летких компонентів виявляють індивідуальні патерни. Вищі спирти і естери демонструють помірну позитивну залежність, тоді як метанол залишався стабільно низьким. Це свідчить про те, що кислотність ґрунту не лише регулює поживний режим рослини, а й опосередковано керує ароматичним профілем кінцевого продукту.

Таким чином, можна стверджувати, що рН ґрунту може розглядатися як важливий параметр ферментативної керованості ароматогенезу, що дозволяє виробникам враховувати кислотність ділянки як один із факторів оптимізації якості дистиляту.

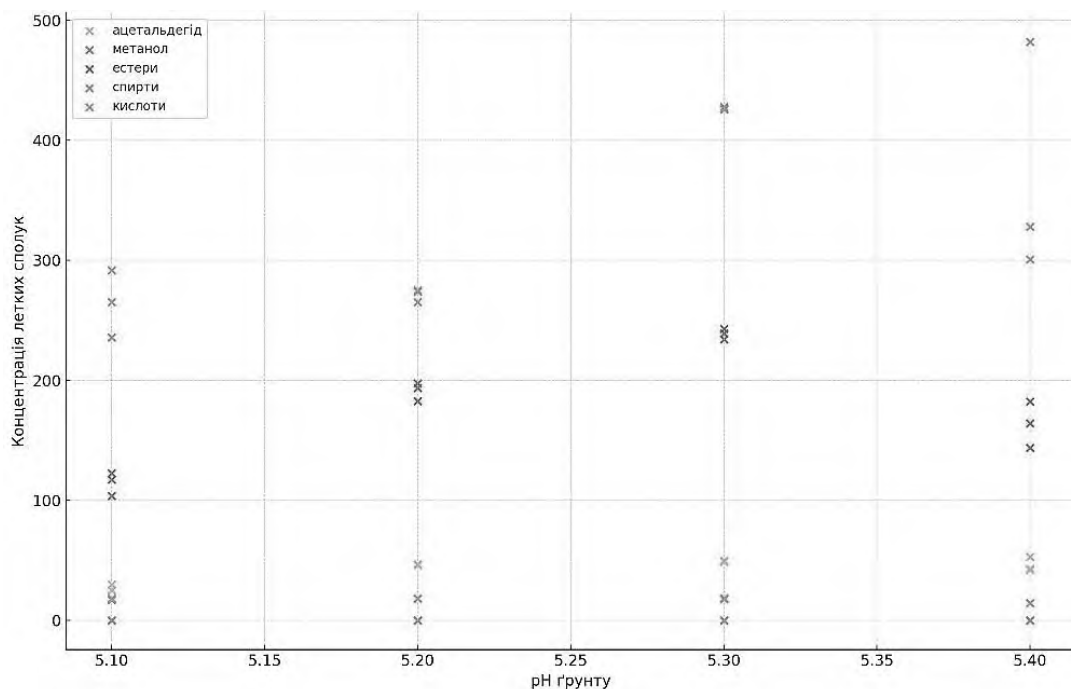


Рис. 2. Залежність показника pH ґрунту з леткими сполуками у яблучних дистилятах
Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом перевіримо залежність летких компонентів яблучних дистилятів від концентрації азоту в ґрунті (рис. 3). В аналізі враховано чотири агроєкологічні зони (Зона 1–4) і три дріжджові раси (Раса 1–3). Азот є одним з ключових макроелементів, що визначає не лише врожайність плодових культур, а й хімічний склад їхньої первинної та вторинної метаболічної продукції [14]. У нашому дослідженні проаналізовано вплив вмісту загального азоту в ґрунті на концентрації летких компонентів – альдегідів, естерів, метанолу, спиртів та кислот – у отриманих яблучних дистилятах.

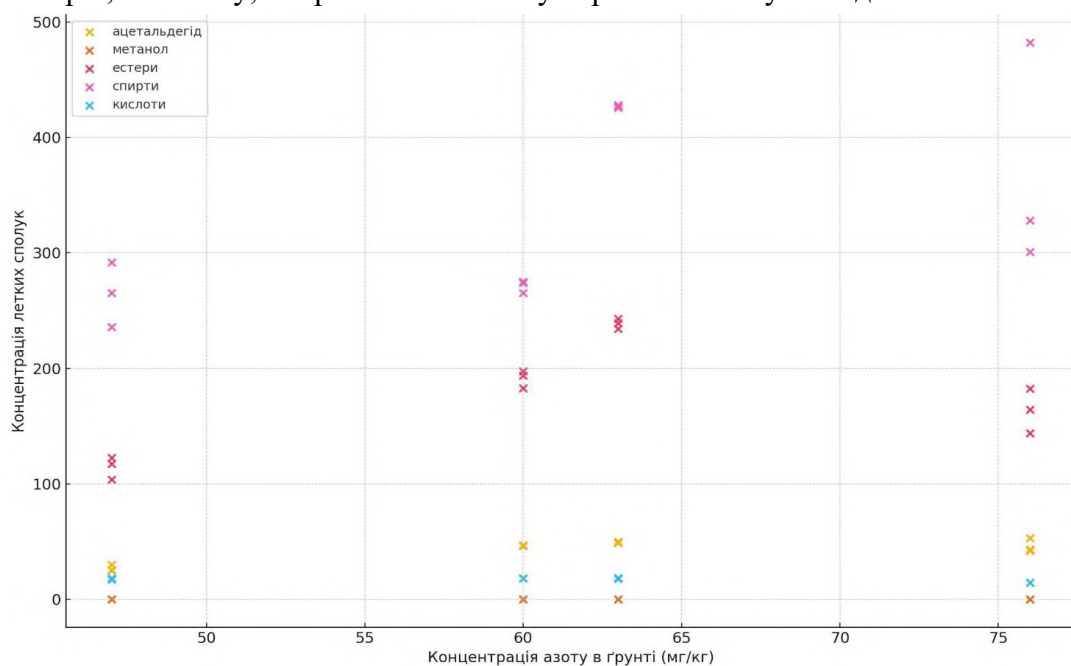


Рис. 3. Залежність летких компонентів яблучних дистилятів від концентрації азоту в ґрунті

Джерело: розроблено авторами.

Усі значення азоту варіювалися в межах від 47 до 76 мг/кг, що відповідає умовам середньо- та високопродуктивних чорноземів та сірих лісових ґрунтів. Виявлено чіткий позитивний вплив азотного живлення на синтез ароматичних метаболітів, особливо – вищих спиртів та естерів.

Найсильнішу кореляцію зафіксовано для ацетальдегіду, збродженого Расою 3 – «Дикі» у Зоні 3 – Шура: $r = +0.962$, що свідчить про потужний позитивний ефект. Це узгоджується з науковими даними про роль азоту у стимуляції амінокислотного метаболізму, що, у свою чергу, активує шляхи біосинтезу вищих спиртів, естерів та альдегідів у дріжджів.

Окрім ацетальдегіду, загалом вищі рівні азоту сприяють зростанню концентрацій ароматичних сполук, покращуючи сенсорні характеристики дистиляту. Це дає підстави розглядати азот не лише як агрономічний, але і як сенсорний модулюючий чинник у виробництві фруктових алкоголю. Відомо, що надлишковий вміст азоту стимулює біосинтез вищих спиртів та естерів через активацію відповідних ферментативних шляхів у дріжджів [15]. Таким чином, вміст азоту в ґрунті виступає не лише агрономічним чинником, а й одним із ключових предикторів якості та сенсорного профілю плодово-алкогольної продукції.

Наступним етапом побудуємо кореляцію між вмістом фосфору в ґрунті та леткими ароматичними компонентами (рис. 4). Фосфор, як елемент живлення, відіграє важливу роль у процесах енергетичного обміну, ферментативної активності та регуляції біосинтетичних шляхів у клітині. Його вплив на ароматичний склад плодового дистиляту менш вивчений, ніж азоту, однак у цьому дослідженні виявлено певні тенденції.

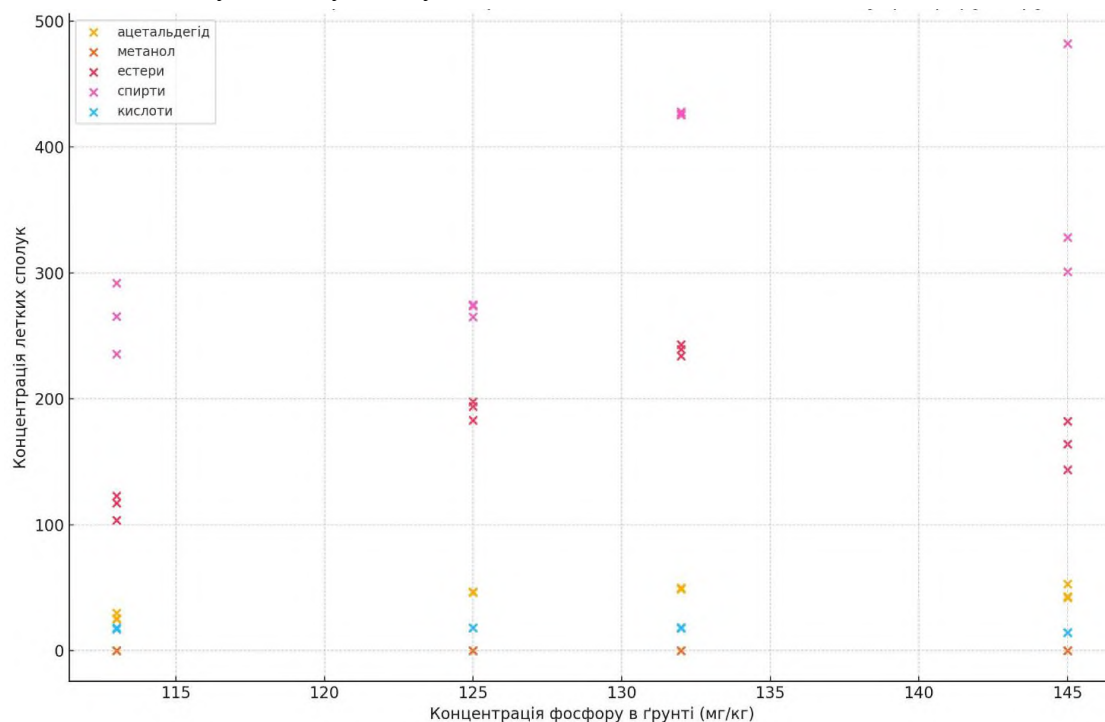


Рис. 4. Залежність концентрації летких ароматичних компонентів у яблучних дистилятах від середнього вмісту фосфору в ґрунті

Джерело: розроблено авторами.

Рисунок 4 відображає взаємозв'язок між концентрацією фосфору в ґрунті та рівнем летких ароматичних сполук у яблучних дистилятах, виготовлених із сорту Айдаред. У розрахунок бралися чотири агрогеографічні зони (Зона 1–4) і три варіанти дріжджів (Раса 1–3).

Діапазон вмісту фосфору становив 113–145 мг/кг, що відповідає добре забезпеченим ґрунтам у межах Лісостепу. Аналіз показав, що фосфорна забезпеченість значно впливає на біосинтез летких сполук, зокрема естерів та ацетальдегіду. Найвищу позитивну

кореляцію встановлено для ацетальдегіду, збродженого Расою 3 – «Дикі» у Зоні 3 – Шура: коефіцієнт $r = +0.881$. Це свідчить про активізацію ферментативних шляхів, пов'язаних з окисненням спиртів до альдегідів, що може бути обумовлено енергетичними механізмами, в яких фосфор відіграє ключову роль (АТФ-залежні реакції).

Також виявлено позитивні тенденції між рівнем фосфору і концентрацією естерів, що визначають фруктові-квіткові ноти напою. Такий вплив пов'язаний із підвищенням метаболічної активності дріжджів і ферментів у багатому фосфором середовищі. Таким чином, фосфор може вважатися метаболічним модулюючим чинником, що впливає на ароматичну насиченість дистиляту. Його значення не варто недооцінювати під час управління якістю сировини на рівні ґрунтового середовища.

Наступним етапом побудуємо кореляцію між вмістом калію в ґрунті та концентрацією летких компонентів у яблучних дистилятах. Калій – важливий мікроелемент, що регулює осмотичний баланс, транспортування цукрів та ферментативну активність у рослинах. У контексті плодово-алкогольної продукції він впливає на накопичення первинних метаболітів, зокрема органічних кислот і цукрів, які є субстратами для бродіння.

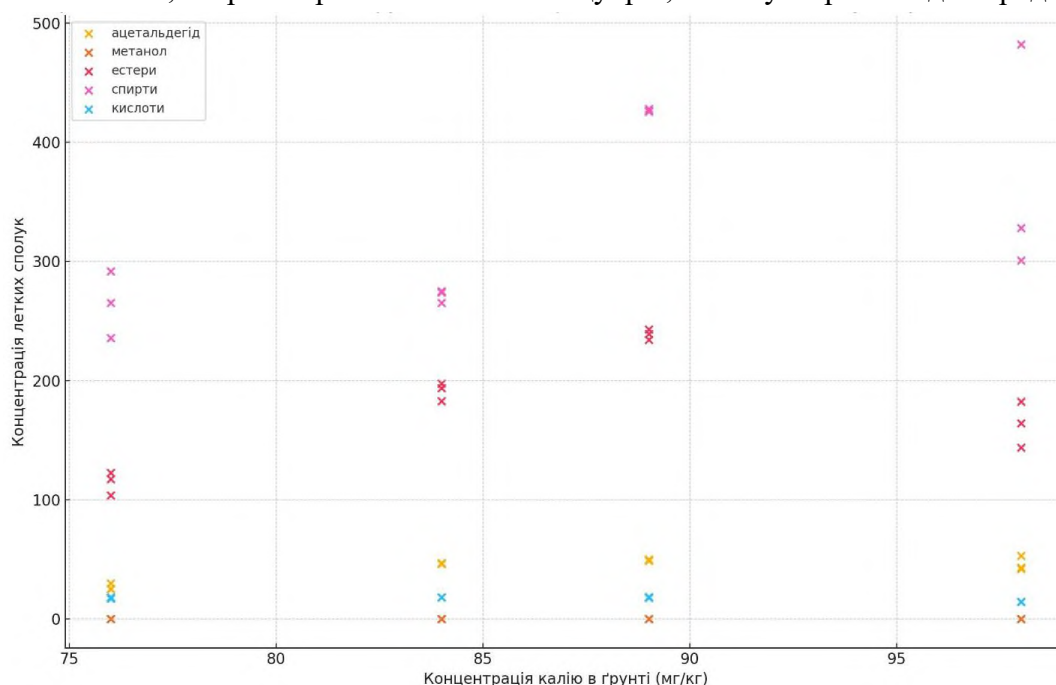


Рис. 5. Кореляція між вмістом калію в ґрунті та концентрацією летких компонентів у яблучних дистилятах

Джерело: розроблено авторами.

Рисунок 5 ілюструє зв'язок між вмістом калію в ґрунті та концентрацією летких ароматичних сполук у яблучних дистилятах, виготовлених із сорту Айдаред. Візуалізовано дані по чотирьох агроєкологічних зонах (Зона 1–4) і трьох расах дріжджів (Раса 1–3). Концентрація калію варіювалася в межах від 76 до 98 мг/кг, що є типовим для чорноземів із середнім і підвищеним рівнем забезпечення цим елементом. Калій відіграє роль у регуляції осмотичного балансу, транспортуванні цукрів та активації ферментів, що опосередковано впливає на метаболізм дріжджів.

Найвищу кореляцію виявлено для ацетальдегіду у дистилятах, зброджених Расою 3 – «Дикі» в Зоні 3 – Шура. Коефіцієнт кореляції склав $r = +0.952$, що свідчить про дуже сильний позитивний зв'язок. Такий ефект може бути зумовлений активізацією пентозофосфатного циклу та ферментів альдегідного метаболізму за умов підвищеного калійного живлення.

Загалом калій сприяв зростанню вмісту ароматичних компонентів, особливо ацетальдегіду та вищих спиртів, хоча його вплив був менш універсальним, ніж у випадку з гумусом або азотом. Водночас, стабільність залежностей підтверджує доцільність урахування калію при плануванні хімічного профілю дистиляту. Біологічно це пояснюється ключовою роллю калію в регуляції транспорту вуглеводів, активації ферментів та підтриманні осмотичного балансу в плодах, що впливає на продукцію ароматичних метаболітів під час ферментації. Таким чином, калій виступає як додатковий метаболічний модулюючий фактор, який сприяє покращенню сенсорного профілю яблучних дистилятів.

Таким чином, калій виступає як додатковий метаболічний регулятор ароматогенезу, який може використовуватися для тонкого налаштування сенсорних характеристик плодової алкогольної продукції.

Зведемо дані у спільну таблицю.

Таблиця 1 – Узагальнююча таблиця кореляцій між агрохімічними показниками ґрунту та леткими компонентами яблучних дистилятів

Ґрунтовий показник	Сполука	Зона	Раса дріжджів	Коефіцієнт кореляції (r)
Гумус	Ацетальдегід	Зона 1–4 (усі)	Раса 3 – «Дикі»	+0,903
pH	Ацетальдегід	Зона 1 – Сокиряни	Раса 2 – «Яблучна 7»	–0,843
Азот (N)	Ацетальдегід	Зона 3 – Шура	Раса 3 – «Дикі»	+0,962
Фосфор (P)	Ацетальдегід	Зона 3 – Шура	Раса 3 – «Дикі»	+0,881
Калій (K)	Ацетальдегід	Зона 3 – Шура	Раса 3 – «Дикі»	+0,952

Джерело: розроблено авторами.

На підставі узагальнюючої таблиці встановлено, що найвищі коефіцієнти кореляції між агрохімічними характеристиками ґрунту та леткими ароматичними компонентами яблучних дистилятів спостерігалися для **ацетальдегіду**. У всіх випадках найвиразніші зв'язки фіксувались при використанні **Раси 3 – «Дикі»** дріжджі, здебільшого у **Зоні 3 – Шура**, що свідчить про оптимальне поєднання теруару та мікрофлори.

Найвищу кореляцію виявлено між вмістом азоту та ацетальдегідом (**r = +0,962**), а також між калієм та ацетальдегідом (**r = +0,952**), що підкреслює критичну роль азотного та калійного живлення у формуванні сенсорного профілю дистиляту. Кореляція з pH виявилася негативною і теж сильною (**r = –0,843**), що підтверджує складний регуляторний вплив кислотності ґрунту на ароматогенез.

Таким чином, **гумус, азот, фосфор і калій** є ключовими агрохімічними предикторами якості яблучного дистиляту, а найчутливішим маркером змін виявився саме **ацетальдегід**. Це дає змогу цілеспрямовано управляти ароматичним профілем продукції шляхом контролю ґрунтового середовища та дріжджових культур.

Статистичний аналіз. Для оцінки взаємозв'язку між кожним агрохімічним параметром ґрунту (pH, гумус, азот (N), фосфор (P), калій (K)) та концентрацією ключових летких сполук у яблучному дистиляті було проведено як лінійний, так і експоненційний кореляційний аналіз. Силу кореляції класифіковано згідно з такими інтервалами:

- Дуже сильна: $|r| > 0,9$
- Сильна: $0,7 < |r| \leq 0,9$
- Середня: $0,4 < |r| \leq 0,7$
- Низька: $|r| \leq 0,4$

Комплексний набір даних виявив стабільні й інформативні закономірності між агрохімічними характеристиками ґрунту та вмістом летких ароматичних сполук у дистиляті. Зокрема:

- pH ґрунтів варіювався від 5,1 до 5,4 ,
- гумус – 1,3–2,8%,

- азот – 47–76 мг/кг,
- фосфор – 113–145 мг/кг,
- калій – 76–98 мг/кг.

Хімічний склад дистилятів. Концентрація ацетальдегіду коливалась у межах 24–55 мг/дм³, з найвищими значеннями у зразках із Зони 3 – Шура при використанні Раси 3 – «Дикі».

Рівень метанолу був стабільно низьким – 0,001–0,009 мг/л, що свідчить про безпечність виробничого процесу. Концентрація естерів варіювалася від 100 до 240 мг/дм³, вищих спиртів – 230–480 мг/дм³. Загальна титрована кислотність залишалася стабільною і становила 14–19 мг/дм³.

Обговорення результатів кореляційного аналізу

Гумус. Проведений кореляційний аналіз виявив стійку позитивну залежність між вмістом гумусу в ґрунті та концентраціями летких ароматичних компонентів, зокрема ацетальдегіду, естерів і ізоамілового спирту в яблучних дистилятах. Найвищі значення цих сполук фіксувалися у зонах з підвищеним вмістом гумусу понад 2% – зокрема, у Зоні 3 (Шура) та Зоні 2 (Жорнище). Найсильніша кореляція встановлена для дріжджів Раси 3 – «Дикі», де коефіцієнт кореляції між гумусом та концентрацією ацетальдегід становив $r = 0,903$, що свідчить про надзвичайну чутливість цього класу сполук до органічного збагачення ґрунту. Така залежність узгоджується з даними щодо стимуляції ферментативної активності в середовищах із вищим вмістом органічної речовини, що може забезпечувати більш сприятливе азотне живлення для дріжджів, а також багатший метаболітний профіль під час ферментації.

рН ґрунту. Найвищі концентрації летких компонентів, включаючи ацетальдегід, естери та ізоаміловий спирт, виявлено у зразках із ґрунтів із рН 5,3–5,4. Найсильніша негативна кореляція з рН встановлена у Зоні 1 (Сокиряни) для Раси 2 – «Яблучна 7» (наприклад, ацетальдегід: $r = -0,843$). Це свідчить про те, що слабокисле до майже нейтрального середовище створює сприятливі умови для бродіння і метаболізму дріжджів, зокрема для утворення ароматичних сполук.

Азот. Рівень загального азоту продемонстрував дуже сильну позитивну лінійну кореляцію з вмістом ацетальдегіду ($r > 0,96$) у всіх зонах (особливо в Зоні 3 – Шура) для всіх рас, з максимумом у Расі 3 – «Дикі». Встановлено також сильні кореляції з естерами та вищими спиртами. Це підтверджує фундаментальну роль азотного живлення у стимуляції дріжджового метаболізму та накопиченні попередників летких ароматичних сполук.

Фосфор. У Зоні 3 (Шура) при дії Раси 3 – «Дикі» зафіксовано найвищу позитивну кореляцію між фосфором і ацетальдегідом ($r = 0,881$), а також виразну залежність для естерів. Фосфор, як компонент енергетичного обміну та синтезу нуклеотидів, опосередковано впливає на дріжджову активність, а отже – і на генерацію ароматичних метаболітів. Така закономірність підтверджує роль фосфору як додаткового регулятора ферментативних процесів.

Калій. Залежність між калієм та леткими компонентами виявилась дуже сильною. Найвиразніша кореляція спостерігалась для ацетальдегіду ($r = 0,952$) у зразках з Зони 3 (Шура) та Раси 3 – «Дикі». Калій бере участь у регуляції осмотичного тиску, транспорту вуглеводів і активності багатьох ферментів, тому його вплив на ароматогенез є опосередкованим, але суттєвим.

Загальні висновки. Результати дослідження підтверджують вирішальний вплив агрохімічних характеристик ґрунту (гумус, азот, рН, фосфор, калій) на хімічний та ароматичний профіль яблучних дистилятів. Найбільш інформативними предикторами були гумус і азот, що формували сильні кореляції з усіма основними леткими компонентами: ацетальдегідом, естерами (етилацетат, етилпропіонат) та вищими спиртами (ізоаміловий

спирт, ізобутанол, 1-бутанол, н-пропанол). Найбільш стабільні та сильні залежності виявлено для Раси 3 – «Дикі», а також у кількох випадках – для Раси 2 та 1, що дозволяє рекомендувати ці поєднання як оптимальні з погляду сенсорного потенціалу.

Висновок. Проведене дослідження підтверджує, що агрохімічні властивості ґрунту мають істотний вплив на формування хімічного складу яблучних дистилятів, зокрема на концентрацію летких ароматичних компонентів. Установлено значущі кореляції між параметрами ґрунтів у чотирьох географічних зонах – Зона 1 (Сокиряни), Зона 2 (Жорнище), Зона 3 (Шура), Зона 4 (Суми) – та рівнями ароматичних сполук, отриманих у результаті ферментації соку за участю трьох рас дріжджів: Раса 1 – «Сидрова 101», Раса 2 – «Яблучна 7», Раса 3 – «Дикі».

Аналіз виявив стабільні та сильні кореляції між вмістом гумусу, азоту, фосфору, калію та рН ґрунту з концентраціями ключових летких компонентів дистилятів – ацетальдегіду, естерів та вищих спиртів.

Особливо значущий вплив продемонстрували:

- Ацетальдегід, як найбільш чутливий індикатор змін агрохімічного фону, що демонстрував найвищі коефіцієнти кореляції (до $r = 0,962$) з вмістом азоту, калію та фосфору.
- Гумус і азот – як основні предиктори ароматогенезу, що стабільно впливали на всі групи летких компонентів.
- Раса 3 – «Дикі» дріжджі – як найбільш інформативна з погляду прояву сильних і стабільних кореляцій в усіх зонах, особливо в Зоні 3 – Шура.

Результати дослідження вказують на можливість управління ароматичним профілем дистиляту через оптимізацію агрохімічних параметрів ґрунту та використання специфічних рас дріжджів у конкретних теруарних умовах.

З практичного погляду, результати відкривають нові можливості для управління ароматичним профілем яблучних дистилятів через цілеспрямоване регулювання складу ґрунтів. Це є цінним інструментом для виробників, які прагнуть досягти стабільної якості, регіональної ідентичності та органолептичної гармонії у своїй продукції.

Напрямки подальших досліджень:

- дослідження механізмів впливу кожного з ґрунтових елементів на ферментативні шляхи та утворення ароматичних сполук;
- розширення експериментів на інші сорти яблук та регіони України;
- розробка моделей прогнозування хімічного складу дистилятів на основі ґрунтового аналізу;
- впровадження польових експериментів із контрольованим внесенням добрив для перевірки каузального впливу;
- вивчення змін аромату та складу дистилятів у часі – під час витримки.

Таким чином, результати роботи не тільки поглиблюють наукове розуміння впливу теруару на якість фруктової сировини, але й створюють базу для практичної оптимізації технологій виробництва плодкових дистилятів.

Список використаних джерел

1. Dick, W. A., Cheng, L., & Wang, P. (2000). Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1915–1919. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
2. Qiu, L. C. Research Progress on the Effects of Soil Acidity and Alkalinity on Plant Growth. (2022). *Open Journal of Applied Sciences*, 12, 1045–1053. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
3. Qi, Y., Wang, R., Qin, Q., & Sun, Q. (2019). Soil affected the variations in grape and wine properties along the eastern foot of Helan Mountain, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 69(6), 494–502. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1611914>.

4. Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Szara, E., & Malina, G. (2022). Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality. *Agronomy*, 12(2), 283. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020283>.
5. Sauze, J., Jones, S. P., Wingate, L., Wohl, S., & Ogée, J. (2018). The role of soil pH on soil carbonic anhydrase activity. *Biogeosciences*, 15(2), 597–612. <https://doi.org/10.5194/bg-15-597-2018>.
6. Wu, X., Bi, J., & Fauconnier, M.-L. (2022). Characteristic volatiles and cultivar classification in 35 apple varieties: A case study of two harvest years. *Foods*, 11(5), 690. <https://doi.org/10.3390/foods11050690>.
7. Dixon, J., & Hewett, E. W. (2000). Factors affecting apple aroma/flavour volatile concentration: A Review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 28(3), 155–173. <https://doi.org/10.1080/01140671.2000.9514136>.
8. Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Jourjon, F., & Prost, C. (2006). Characterization of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivars and maturity stage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(7), 2678–2687. <https://doi.org/10.1021/jf052288n>.
9. Echeverría, G., Fuentes, T., Graell, J., Lara, I., & López, M. L. (2004). Aroma volatile compounds of ‘Fuji’ apples in relation to harvest date and cold storage technology. *Postharvest Biology and Technology*, 32(1), 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.09.017>.
10. Ferreira, L., Perestrelo, R., Caldeira, M., & Câmara, J. S. (2009). Characterization of volatile substances in apples from Rosaceae family by headspace solid-phase microextraction followed by GC-qMS. *Journal of Separation Science*, 32(11), 1875–1888. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900024>.
11. Espino-Díaz, M., Sepúlveda, D.R., González-Aguilar, G., & Olivas, G.I. (2016) Biochemistry of Apple Aroma: A Review. *Food Technol. Biotechnol.*, 54, 375–397. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.04.16.4248>.
12. Aprea, E., Corollaro, M. L., Betta, E., Endrizzi, I., Demattè, M. L., Biasioli, F., & Gasperi, F. (2012). Sensory and instrumental profiling of 18 apple cultivars to investigate the relation between perceived quality and odour and flavour. *Food Research International*, 49(2), 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.023>.
13. Stoica, F., Camelia, M. C., Giugea, N., Mărcăneanu, L. C., & Ionete, R. (2019). Volatile compounds in different fraction of fruits distillate obtained by traditional distillation. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 23(2), 27–34.
14. Kowalczyk W., Wrona D., & Przybyłko S. (2022). Effect of nitrogen fertilization of apple orchard on soil mineral nitrogen content, yielding of the apple trees and nutritional status of leaves and fruits. *Agriculture*, 12(12), 2169. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122169>.
15. Bimbela, F., Cachero, A., & Masson, E. (2021). Influence of nitrogen supply on the production of higher alcohols and esters and expression of flavour-related genes in cachaça fermentation. *Food Chemistry*, 338, 128106. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128106>.

References

1. Dick, W. A., Cheng, L., & Wang, P. (2000). Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1915–1919. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
2. Qiu, L. C. Research Progress on the Effects of Soil Acidity and Alkalinity on Plant Growth. (2022). *Open Journal of Applied Sciences*, 12, 1045–1053. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
3. Qi, Y., Wang, R., Qin, Q., & Sun, Q. (2019). Soil affected the variations in grape and wine properties along the eastern foot of Helan Mountain, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 69(6), 494–502. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1611914>.
4. Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Szara, E., & Malina, G. (2022). Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality. *Agronomy*, 12(2), 283. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020283>.
5. Sauze, J., Jones, S. P., Wingate, L., Wohl, S., & Ogée, J. (2018). The role of soil pH on soil carbonic anhydrase activity. *Biogeosciences*, 15(2), 597–612. <https://doi.org/10.5194/bg-15-597-2018>.
6. Wu, X., Bi, J., & Fauconnier, M.-L. (2022). Characteristic volatiles and cultivar classification in 35 apple varieties: A case study of two harvest years. *Foods*, 11(5), 690. <https://doi.org/10.3390/foods11050690>.

7. Dixon, J., & Hewett, E. W. (2000). Factors affecting apple aroma/flavour volatile concentration: A Review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 28(3), 155–173. <https://doi.org/10.1080/01140671.2000.9514136>.
8. Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Jourjon, F., & Prost, C. (2006). Characterization of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivars and maturity stage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(7), 2678–2687. <https://doi.org/10.1021/jf052288n>.
9. Echeverría, G., Fuentes, T., Graell, J., Lara, I., & López, M. L. (2004). Aroma volatile compounds of 'Fuji' apples in relation to harvest date and cold storage technology. *Postharvest Biology and Technology*, 32(1), 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.09.017>.
10. Ferreira, L., Perestrelo, R., Caldeira, M., & Câmara, J. S. (2009). Characterization of volatile substances in apples from Rosaceae family by headspace solid-phase microextraction followed by GC-qMS. *Journal of Separation Science*, 32(11), 1875–1888. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900024>.
11. Espino-Díaz, M., Sepúlveda, D.R., González-Aguilar, G., & Olivas, G.I. (2016) Biochemistry of Apple Aroma: A Review. *Food Technol. Biotechnol.*, 54, 375–397. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.04.16.4248>.
12. Aprea, E., Corollaro, M. L., Betta, E., Endrizzi, I., Demattè, M. L., Biasioli, F., & Gasperi, F. (2012). Sensory and instrumental profiling of 18 apple cultivars to investigate the relation between perceived quality and odour and flavour. *Food Research International*, 49(2), 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.023>.
13. Stoica, F., Camelia, M. C., Giugea, N., Mărcăneanu, L. C., & Ionete, R. (2019). Volatile compounds in different fraction of fruits distillate obtained by traditional distillation. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 23(2), 27–34.
14. Kowalczyk W., Wrona D., & Przybyłko S. (2022). Effect of nitrogen fertilization of apple orchard on soil mineral nitrogen content, yielding of the apple trees and nutritional status of leaves and fruits. *Agriculture*, 12(12), 2169. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122169>.
15. Bimbela, F., Cachero, A., & Masson, E. (2021). Influence of nitrogen supply on the production of higher alcohols and esters and expression of flavour-related genes in cachaça fermentation. *Food Chemistry*, 338, 128106. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128106>.

Отримано 20.06.2025

UDC 663.2:631.41:543.544:519.24

Olexander Lukanin¹, Nataliia Melnyk²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAAS
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: 0752las@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7786-5942>

²leading specialist in the Department of Landscape Protection, Biodiversity Conservation, and Nature Preservation
Institute of Agroecology and Nature Management NAAS NAAS (Kyiv, Ukraine)

E-mail: 17natasha17@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1667-6780>

CORRELATIONS BETWEEN THE INFLUENCE OF SOIL AND OTHER FACTORS ON THE QUALITY OF APPLE DISTILLATES

This article presents the results of an interdisciplinary study on the influence of soil agrochemical characteristics on the aromatic profile of apple distillates produced from the 'Idared' variety in four regions of Ukraine (Dnister Horticultural Corporation, Sokyryany, Chernivtsi region – zone 1; Zhornyshche, Illinets district, Vinnytsia region – zone 2; Shura Kopyivska, Vinnytsia region – zone 3; Research station of the Institute of Horticulture of the National Academy of Agrarian Sciences, Maly Sambir, Sumy region – zone 4).

The research encompassed the full production cycle of apple distillates, including agrochemical soil analysis (determination of pH, humus content, nitrogen, phosphorus, and potassium levels), harvesting of 'Idared' apples, juice quality assessment, fermentation with three yeast strains ("Sydrova 101," "Yabluchna 7," and wild microflora), distillation to raw alcohol, and production of the final spirit. The final stage involved gas chromatographic analysis of the distillates to determine the concentrations of volatile compounds contributing to the product's aromatic profile. All collected data were compiled into an integrated analytical matrix for correlation analysis.

The relationships between humus content, macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium), soil pH, and the concentrations of volatile compounds such as acetaldehyde, methanol, esters (ethyl acetate, ethyl propionate), and higher alcohols (isoamyl alcohol, isobutanol, 1-butanol, n-propanol) were evaluated. The correlation analysis, which included both linear and exponential models, revealed strong to very strong dependencies, particularly between humus levels and esters, nitrogen and acetaldehyde, and soil pH and the overall aromatic profile.

The findings confirm the critical role of terroir-particularly the agrochemical composition of soils-in shaping the sensory characteristics of apple distillates. Higher levels of soil humus and nitrogen were associated with increased concentrations of esters and higher alcohols that define the fruity and floral aromas of the product, while soil pH significantly influenced acetaldehyde levels, contributing to fresh, green aromatic notes. These correlations remained stable across all studied regions and yeast strains, suggesting that these parameters serve as key predictors of apple distillate quality. The study highlights opportunities for targeted soil management to regulate the quality and regional identity of alcoholic beverages.

Keywords: fruit distillates, soil, volatile compounds, nitrogen, potassium, phosphorus, Idared.

Fig.: 5. Table: 1. References: 15.