

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.37>

УДК 004.421.2:004.4'22:631.153

Структури даних та програмування моделей технологічних процесів рільництва

Луб Павло Миронович¹⁾

Доцент каф. Інформаційних технологій

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9600-0969>; pollylub@ukr.net. Scopus Author ID: 57213689503

Олійник Роман Володимирович²⁾

Аспірант каф. Менеджменту організацій

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5569-0595>; oliynyk1980@gmail.com

Фіялковський Віталій Іванович¹⁾

Ст. викладач каф. Інформаційних технологій

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6995-4000>; vitalik.fiyalkovsky@i.ua

Заплатинський Назар Богданович¹⁾

Ст. викладач каф. Інформаційних технологій

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7767-8795>; hayk.ukr@gmail.com

¹⁾ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького
вул. В. Великого, 1, Дубляни, Львівський р-н, 80831, Україна

²⁾ Національний університет «Львівська Політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79000, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглядається застосування цифровізації та ІТ-сервісів у сільському господарстві для формування структур даних, що уможливають математичний опис мінливих агрометеорологічних умов окремого календарного періоду. На цій основі пропонується адаптація інформаційних сервісів до супроводу рішень із управління технологічними процесами у рільництві, зокрема під час збирання врожаю культури. Показано роль інформаційно-аналітичних систем, комп'ютерного моделювання та цифрових платформ у зборі та структуризації даних, прогнозуванні клімату та росту культур, оптимізації технологічних процесів, управлінні ресурсами та підвищенні продуктивності агросистем за умов кліматичних ризиків і складності виробничого середовища. Акцентовано на тому, що ІТ в агропромисловому виробництві забезпечують моніторинг, планування, моделювання процесів та підтримку управлінських рішень для підвищення ефективності. Окреслено передумови використання ІТ для розробки інформаційно-аналітичних інструментів підтримки прийняття рішень у проектах розвитку агропромислового комплексу. Проведено аналіз існуючих підходів до дослідження технологічних систем із мінливим зовнішнім середовищем за допомогою методів моделювання, зокрема з використанням ІТ. Виявлено основні складові проектів технологічних систем та охарактеризовано вплив зовнішнього проектного середовища. Встановлено причини варіативності зовнішніх умов виконання технологічних процесів (на прикладі збирання врожаю) та обґрунтовано необхідність застосування методів статистичного імітаційного моделювання. Підкреслено доцільність створення сукупності моделей, що відтворюють окремі складові технологічної системи збирання врожаю культурних рослин. Виокремлено компоненти зовнішнього проектного середовища, які визначають ймовірнісне формування тривалості фонду часу на виконання робіт у технологічній системі, а відтак – формують структури даних для побудови імітаційної моделі. Наведено основні елементи методики, яка дозволяє статистичною імітаційною моделлю враховувати вплив агрометеорологічних умов на фонд часу для виконання робіт в осінній період у проектах технологічних систем збирання цукрових буряків. Виконано моделювання та узагальнено його результати. Показано використання методів кореляційно-регресійного аналізу для встановлення закономірностей зміни тривалості природно дозволеного фонду часу відносно планового часу початку збирання врожаю та обґрунтовано кореляційну залежність. Встановлено закономірності зміни тривалості фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт і визначено статистичні характеристики цього показника для різних календарних термінів початку робіт. Наведено диференціальні функції розподілу тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт в осінній період.

Ключові слова: структури даних; диференціальні функції; погодні умови; фонд часу; технологічна система; збирання врожаю; імітаційне моделювання; інформаційна система; управління, ефективність

Актуальність. У сучасному світі цифровізація й ІТ-сервіси стають невід'ємною частиною національного господарства: від торгівлі й послуг до енергетики й транспорту, і сільське господарство не є виключенням [1]. Аграрна сфера має свою особливість – вона прямо залежить від природних чинників, таких як погода, вологість, температура й інші агрометеорологічні умови, які неможливо корегувати в польових умовах. Щоб адаптуватися до цієї мінливості та планувати польові роботи з максимальною ефективністю, невід'ємною

стає потреба у розвитку інформаційних систем, моделювання та модельованої підтримки рішень: збір даних із мереж агрометеорологічних станцій і самих виробників, їх структуризація, математичне описання та розробка комп'ютерних моделей для прогнозування кліматичних умов, росту культур і алгоритмів агротехнологій тощо. Такі інформаційно-аналітичні системи дозволяють досліджувати складні взаємозв'язки в агросистемах, моделювати сценарії, керувати ресурсами в часі, оптимізувати технологічні процеси та підвищувати продуктивність галузі за умов кліматичних ризиків.

Водночас, в сучасних умовах цифровізації агросектору цифрові платформи суттєво посилюють обмін знаннями між зацікавленими сторонами (фермерами, дослідниками, держструктурами) і прискорюють інтеграцію інформаційних систем (ІС) в управлінські процеси агровиробництва. Ці процеси підсилюються значними обсягами даних із агрометеорології, а також розробками методів дистанційного зондування, ГІС, великих даних і аналітики, а відтак призводять до підвищення складності ІС, процесів моделювання щодо поведінки виробничої системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що інформаційні технології активно впроваджуються в різні напрями аграрного виробництва. Вони застосовуються для рекламування й просування продукції на ринки збуту, взаємодії з партнерами та дилерами, організації дистанційного моніторингу використання ресурсів під час виконання польових робіт, а також для планування та корекції виробничих процесів [5, 11]. Сьогодні ІТ відкривають можливості для створення інформаційно-аналітичних систем, які поєднують комплекс взаємозалежних імітаційних моделей, кожна з яких відображає окремий аспект функціонування виробничої системи [2, 3, 5], зокрема агрометеорологічні умови, технологічні процеси, логістику, рух матеріальних потоків чи управлінські функції. Узагальнення результатів наукових досліджень у сфері агропромислового комплексу підкреслює актуальність і необхідність розроблення та вдосконалення таких методів, моделей і систем. Їх використання істотно спрощує управління проектами, сприяє підтримці прийняття рішень як на стратегічному, так і на тактичному рівнях, а також забезпечує необхідний інформаційний фундамент для розвитку агробізнесу через ф'ючерсні угоди, залучення кредитів із низькими ставками та реалізацію державних інвестицій у підвищення капіталізації галузі.

Метою дослідження є розкрити особливості і методику формування структур даних, що відображають вплив природних умов на перебіг технологічних процесів у рільництві. Означити математично-модельні можливості для створення імітаційних моделей технологічних процесів збирання врожаю та створення на їх основі інформаційних систем для супроводу управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. Своєчасність виконання польових робіт у рільництві виступає одним із ключових чинників, що безпосередньо визначає рівень урожайності культур та формує економічні результати діяльності аграрного підприємства [1]. При цьому обсяг виробленої продукції протягом року зумовлюється сукупною дією значної кількості факторів, більшість з яких має природне походження і характеризується некерованістю або частковою можливістю впливу [2–5]. Стохастичний характер агрометеорологічних умов спричиняє необхідність постійного коригування термінів і змісту окремих операцій, визначення обсягів необхідних ресурсів, а також потребує розвиненого моніторингу й доступу до актуальної інформації для ухвалення оперативних управлінських рішень щодо доцільності тих чи інших змін у технологічних процесах вирощування культур [7, 8].

За таких умов управління технологічними системами рільництва та організація сезонних польових робіт вимагають застосування сучасних інформаційно-аналітичних систем, які функціонують на основі ІТ. Використання таких систем забезпечує підвищення ефективності управлінських рішень, що у свою чергу дає змогу гарантувати виконання планових

показників виробництва продукції. Зокрема, важливим є формування моделей, здатних враховувати як специфіку галузі, так і вплив некерованих природних чинників (зовнішнього середовища) на перебіг робіт. Такі моделі сприяють оптимізації термінів виконання технологічних операцій, підвищенню гнучкості управління та зростанню результативності виробничих процесів.

Особливістю прикладної сфери рільництва є необхідність узгодження виробничих операцій із природними процесами – ростом і розвитком культурних рослин, динамікою агрометеорологічних умов, формуванням агрофону поля та станом ґрунтової родючості.

Згідно з теорією систем і принципами технології моделювання, будь-який фізичний процес може бути формалізований у вигляді моделі, що відкриває можливості для його аналізу та відтворення за різних умов. Такий підхід дозволяє здійснювати варіативний аналіз сценаріїв організації польових робіт, оцінювати потенційні ризики та формувати рекомендації для підтримки процесу ухвалення рішень на всіх рівнях управління. Використання ІТ у цьому контексті забезпечує інтеграцію широкого спектра інструментів – від мобільних застосунків і сенсорних систем моніторингу до складних веб-ресурсів та корпоративних платформ управління агробізнесом. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню якості планування, оперативності реагування на зміни середовища та стратегічній стійкості виробничих систем у галузі рільництва.

Початковим етапом побудови моделей технологічних систем у рільництві є детальний аналіз взаємозв'язків та математичний опис основних складових, що безпосередньо впливають на показники ефективності їх функціонування [6, 9]. Тривалість збиральних процесів формується під дією комплексу чинників, серед яких виокремлюються як керовані, так і некеровані, зумовлені впливом агрометеорологічних і біологічних умов [7, 8]. Для врахування стохастичного характеру цих впливів важливим є встановлення статистичних закономірностей зміни природно зумовленого фонду часу (t_{na}), упродовж якого можливе виконання технологічних операцій із застосуванням відповідних технічних засобів, зокрема збиральних комбайнів.

Методика визначення таких закономірностей ґрунтується на поєднанні загальнодоступних інформаційних ресурсів, структурованих даних із виробничих спостережень та результатів комп'ютерних експериментів, проведених із використанням статистичної імітаційної моделі. Відображення у цій моделі ймовірнісних подій, характерних для періоду збирання врожаю, забезпечує можливість багаторазових ітерацій та дозволяє відтворити стохастичний вплив агрометеорологічних умов на зміну t_{na} , а також на продуктивність застосовуваної техніки.

Результати таких комп'ютерних експериментів з імітаційною моделлю надають змогу не лише визначити статистичні характеристики динаміки t_{na} у межах конкретного календарного періоду, але й оцінити ризики, пов'язані з його мінливістю. Відомо [7], що параметр t_{na} описує часовий інтервал між датою початку збиральних робіт (τ_{sw}) та моментом настання критичних подій, що унеможливають подальше їх виконання.

Для цукрових буряків такими подіями виступають настання заморозків нижче $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (τ_{-5}) або втрата фізичної стиглості ґрунту (τ^f), яка блокує використання техніки на полях [5] (рис. 1).

Оскільки час настання цих подій має ймовірнісний характер, то й тривалість t_{na} необхідно розглядати як випадкову величину. Додатково, наявність несприятливих погодних проміжків у процесі збирання також скорочує t_{na} , що підвищує ризики реалізації проєктів та обґрунтовує необхідність використання інформаційних технологій для створення імітаційних моделей і відповідного програмного забезпечення.

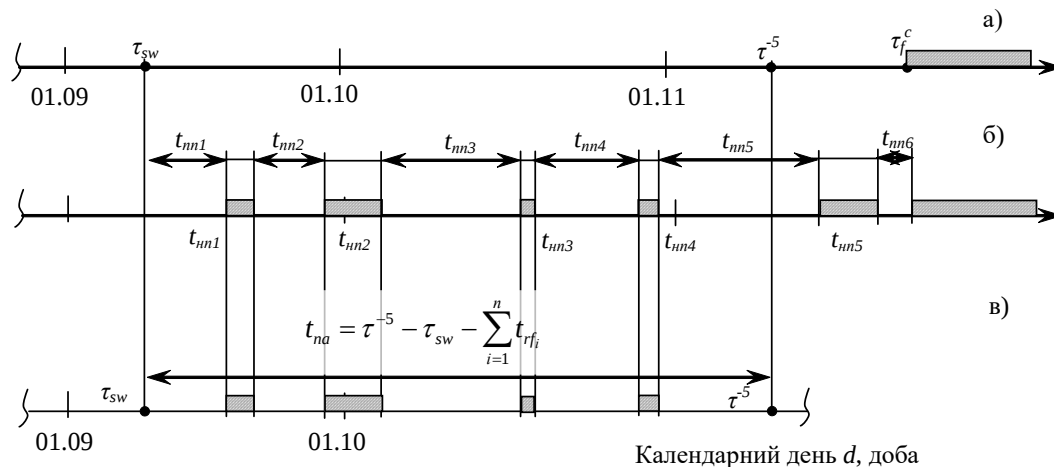


Рис. 1. Графічне відображення методики формування даних щодо природно зумовленого фонду часу на виконання польових робіт (на прикладі збирання врожаю культури):
а – календарні терміни початку та завершення робіт;
б – тривалість погожих та непогожих проміжків;
в – природно зумовлений фонд часу; t_{nn} , t_{nn} – тривалість погожих та непогожих проміжків часу, діб

Методика оцінювання ризику параметра t_{na} із застосуванням ІТ-інструментів полягає у проведенні мінімально необхідної кількості реалізацій статистичної імітаційної моделі агрометеорологічних умов для осіннього періоду (з 1 вересня до 30 листопада). При цьому здійснюється визначення кількості днів, упродовж яких стан ґрунту забезпечував можливість виконання збиральних робіт із цукровими буряками. Оскільки аналіз параметра t_{na} виконується з урахуванням чотирьох імовірнісних показників – t_{nn} , t_{nn} , τ^{-5} та τ_{ϕ}^3 , то для адекватного відображення їх комплексної взаємодії доцільним є проведення серії з $N_p = 254$ реалізацій імітаційної моделі із застосуванням методу «вкладених циклів». Такий підхід забезпечує формування репрезентативних вибірок емпіричних даних і дозволяє обґрунтовано оцінити ризик змінюваності часових параметрів виконання збиральних робіт.

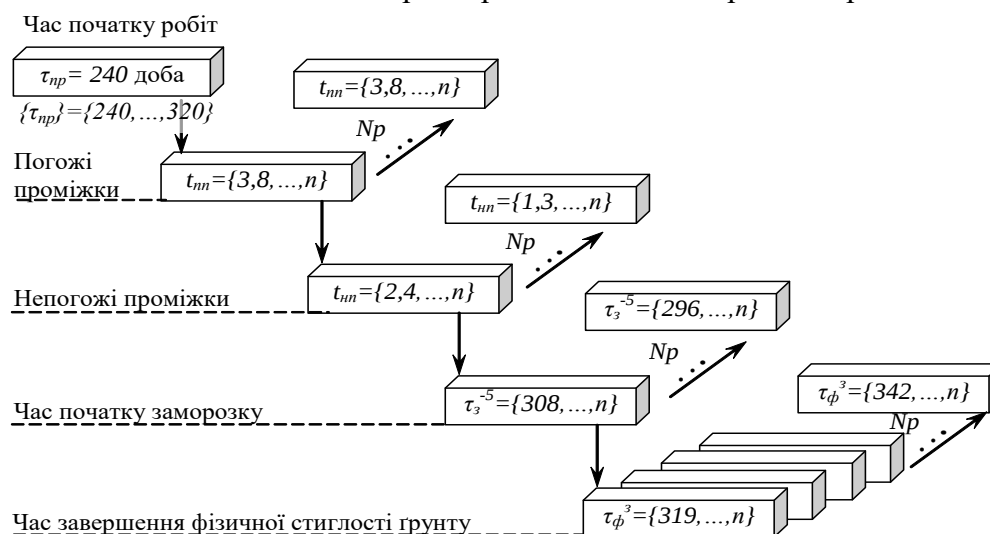


Рис. 2. Структура даних та їх типи для відображення погодних умов (для календарного періоду збирання врожаю)

Реалізація методу «вкладених циклів» у програмному коді імітаційної моделі технологічної системи здійснюється із використанням генератора псевдовипадкових чисел $\text{rand}(x)$, що входить до стандартної бібліотеки мови програмування С# [10]. Застосування цього інструменту дозволяє відтворювати закони розподілу [5, 8] для кожного з імовірнісних параметрів $(t_{nn}, t_{nn}, \tau^{-5}, \tau_{\phi}^3)$ та моделювати їх інтегральний вплив на величину фонду часу t_{na} :

$$\text{temp} = (c + a * \text{Math.Exp}((1 / b) * (\text{Math.Log}(-(\text{Math.Log}(\text{rd.NextDouble()})))))),$$

де temp – змінна, що декларує ймовірнісний показник $(t_{nn}, t_{nn}, \tau^{-5}$ або $\tau_{\phi}^3)$; $\text{rd.NextDouble}()$ – функція, що генерує псевдовипадкову величину для прикладу мови програмування С# [10]; a, c, b – відповідно коефіцієнти рівняння оберненої функції розподілу, що описує розподіл випадкової величини $t_{nn}, t_{nn}, \tau^{-5}$ та τ_{ϕ}^3 .

Застосування такого підходу для врахування стохастичного впливу зовнішніх чинників у моделі технологічної системи збирання врожаю забезпечує можливість багаторазової реалізації імітаційних експериментів з подальшим отриманням значень параметра t_{na} . Це дозволяє простежити закономірності його зміни та визначити закон розподілу даної випадкової величини. Наступне опрацювання отриманих структур даних із використанням методів кореляційно-регресійного аналізу для дослідження залежності t_{na} від планового терміну початку робіт τ_{sw} дає змогу обґрунтувати кореляційний зв'язок між цими показниками.

Застосування інструментарію математичної статистики до варіаційних рядів емпіричних даних t_{na} для різних календарних термінів початку збирання врожаю (наприклад, цукрового буряка) дало змогу, на підставі критерію χ^2 Пірсона, визначити відповідний теоретичний закон розподілу цієї випадкової величини. У результаті було встановлено, що для різних значень τ_{sw} емпіричний розподіл t_{na} узгоджується з різними теоретичними законами.

Зокрема, для варіанту початку робіт з 1 вересня розподіл значень t_{na} відповідає нормальному закону розподілу.

У цьому випадку диференціальна функція має вигляд:

$$f(t_{na}) = 0,037 \cdot \exp \left[-\frac{(t_{na} - 42,09)^2}{159,189} \right]. \quad (1)$$

Для періоду між 20 вересня та 10 жовтня відповідно ймовірнісне значення t_{na} відображатиметься трипараметричним законом Вейбулла:

$$\text{– 20 вересня:} \quad f(t_{na}) = 0,088 \cdot \left(\frac{t_{na} - 10}{25,215} \right)^{1,213} \cdot \exp \left[\left(\frac{t_{na} - 10}{25,215} \right)^{2,213} \right]; \quad (2)$$

$$\text{– 10 жовтня:} \quad f(t_{na}) = 0,114 \cdot \left(\frac{t_{na} - 1}{18,922} \right)^{1,16} \cdot \exp \left[-\left(\frac{t_{na} - 1}{18,922} \right)^{2,16} \right]. \quad (3)$$

Врахування особливостей технологічних процесів предметної галузі у статистичній імітаційній моделі дозволяє відтворити як агрометеорологічну, так і біологічну складові, оцінити їхній вплив на перебіг та своєчасність виконання робіт, а також забезпечити розвиток інформаційно-аналітичного супроводу управлінських рішень на основі ІТ-інструментів, що моделюють роботи у проектах із некерованим (природним) середовищем.

Висновки. Застосування ІТ та методів статистичного імітаційного моделювання для врахування впливу агрометеорологічних факторів на перебіг робіт у технологічних системах рослинництва дозволяє отримати об'єктивні результати комп'ютерних експериментів, визначити закономірності зміни функціональних показників ефективності при використанні відповідного технічного забезпечення та забезпечити інформаційно-аналітичний супровід прийняття управлінських рішень.

Методика комп'ютерних експериментів базується на статистичному імітаційному моделюванні виконання робіт у віртуальному проєкті з урахуванням прогнозованих умов проєктного середовища. Застосування методів математичної статистики для обробки відповідних структур даних та результатів імітаційного моделювання із оцінки ризику тривалості (t_{na}) природно дозволеного фонду часу виконання робіт дозволило на основі критерію χ^2 Пірсона встановити відповідні теоретичні закони розподілу випадкових величин.

Зокрема, розподіл t_{na} варіюється залежно від планового терміну початку робіт. Для початку робіт 1 вересня емпіричний розподіл t_{na} відповідає нормальному закону розподілу, тоді як для 20 вересня та 10 жовтня він підпорядковується закону Вейбулла

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Бюджет 2024 – яку державну підтримку заклали для агросектору?» *Гаряча агрополітика*. 2023. – URL: <https://agropolit.com/spetsproekty/1025-byudjet-2024--yaku-derjavnu-pidtrimku-zaklali-dlya-agrosektoru>.
2. Днесь В. І. «Обґрунтування параметрів зернозбирально-транспортних комплексів для сільськогосподарських товаровиробників»: *автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та техн. наук: спец. 05.05.11. Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва»*. Глеваха. 2015.
3. Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В. «Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки прийняття рішень». *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024; 28: 188–193. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.191>.
4. Польовий А. М., Божко Л. Ю., Вольвач О. В. «Основи агрометеорології»: Підручник Одеський державний екологічний університет *Видавництво ТЕС. Одеса: Україна*. 2012.
5. Пукас В. Л. «Обґрунтування параметрів технічного забезпечення технологічного процесу збирання цукрових буряків»: *автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.05.11. Львів: Україна*. 2020.
6. Bertalanffy L., Hofkirchner W., Rousseau D. “General system theory”. *Foundations, development, applications, 1st. ed.*, George Braziller Inc, New York, NY. 2015.
7. Lub P., Tryhuba, A., Padyuka, R., Berezovetsky, S., Chubyk, R. “Simulation modeling usage in the information system for the technological systems project management”. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023; 3453: 139–148.
8. Lub P., Berezovetsky S., Padyuka R., Chubyk R. “Information-analytical support of project management processes with the use of simulation modeling methods”. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022; 3109: 53–57. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.6.10>.
9. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. “Simulation and the Monte Carlo method”. *3-nd ed.*, Wiley, New Jersey. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118631980>.
10. Schildt H. “C#. The Complete Reference”. *Osborne: The McGraw-Hill Companies*. 2003.
11. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. “Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects”. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022; 3109: 25–31.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.37>

UDC 004.421.2:004.4'22:631.153

Data structures and programming of agricultural technological process models

Pavlo M. Lub¹⁾

PhD, Associate Professor, Department of Information Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9600-0969>; pollylub@ukr.net. Scopus Author ID: 57213689503

Roman V. Oliynyk²⁾

Postgraduate student, Department of Organizational Management
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5569-0595>; oliynyk1980@gmail.com

Vitaly I. Fiialkovsky¹⁾

Senior Lecturer, Department of Information Technologies
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6995-4000>; vitalik.fiyalkovsky@i.ua

Nazar B. Zaplatynskyi¹⁾

Senior Lecturer, Department of Information Technologies
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7767-8795>; hayk.ukr@gmail.com

¹⁾ Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, 1 V. Velykoho St.,
Dublyany, Lviv district, 80831, Ukraine

²⁾ Lviv Polytechnic National University, 12, Stepan Bandera Str. Lviv, 79000, Ukraine

ABSTRACT

This study examines the application of digitalization and IT services in agriculture to develop data structures that enable mathematical description of changing agrometeorological conditions over specific calendar periods. Based on this approach, information services are adapted to support decision-making in managing technological processes, particularly during crop harvesting. The role of information and analytical systems, computer modeling, and digital platforms in data collection, climate and crop growth forecasting, process optimization, resource management, and productivity enhancement under climatic risks and complex production environments is emphasized. IT in agriculture facilitates monitoring, planning, process modeling, and management decision support to improve efficiency.

The prerequisites for using IT in the development of analytical tools for decision support in agro-industrial projects are outlined. Existing approaches to studying technological systems under variable external conditions using IT-based modeling methods are analyzed. Key components of technological system projects are identified, and the influence of the external design environment is characterized. Factors causing variability in external conditions during technological processes, exemplified by harvesting, are determined, justifying the use of statistical simulation modeling.

The study emphasizes the creation of models representing individual components of harvesting technological systems. Components of the external design environment that determine the probabilistic formation of the work time fund are identified, forming the basis for simulation modeling. A methodology enabling statistical simulation to account for the influence of agrometeorological conditions on work duration during autumn sugar beet harvesting is presented. Modeling results are summarized, showing the use of correlation-regression analysis to identify patterns in the naturally allowed time fund relative to the planned harvesting start. Patterns of time fund variation and their statistical characteristics are established for different start dates. Differential distribution functions for the duration of the naturally allowed time fund during autumn beet harvesting are provided.

The proposed approach demonstrates the effectiveness of IT-driven modeling and analytics in optimizing agricultural processes, supporting management decisions, and mitigating the impact of environmental variability on crop harvesting.

Keywords: Data structures; differential functions; weather conditions; time fund; technological system; harvesting; simulation modeling; information system; management; efficiency