

Р. Е. Пащенко^{1,2}, М. В. Марюшко²

¹ Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, Україна

² Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ВРОЖАЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОГО ОПИСУ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ ТА ІНДИКАТОРІВ СТАНУ ПОСІВІВ

Анотація. Предметом дослідження є оцінка можливості прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур при нечіткому описі чинників впливу та спеціальних індикаторів стану рослин. **Об'єктом** дослідження є визначення рівня врожаю в заданий момент часу при відомих чинниках впливу та індикаторах стану рослин, які отримуються з використанням дистанційних засобів. **Метою** є розгляд методу та обґрунтування прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур при нечіткому описі чинників, що на нього впливають, та індикаторів стану посівів. **Завдання:** аналіз різноманітних методів моніторингу стану сільськогосподарських культур та прогнозування їх врожаю; визначення чинників впливу на рівень врожаю та індикаторів стану посівів; розгляд можливості представлення чинників впливу та індикаторів з використанням теорії нечітких множин; оцінка можливості використання даних дистанційного зондування для отримання чисельних значень чинників впливу та індикаторів стану посівів; розробка методу прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів; обґрунтування прийняття рішення про рівень врожаю сільськогосподарських культур при заданих значеннях чинників впливу та індикаторів стану посівів. **Отримані наступні результати.** У результаті дослідження було введено нечіткий опис чинників впливу та індикаторів стану посівів. Показано, що нечіткий опис може застосовуватися для чинників впливу, що визначаються, як кількісно, так і якісно. На основі такого опису розроблено метод прийняття рішення про рівень врожаю з урахуванням індексу NDVI і фрактальної розмірності. Наведено результати визначення різних ступенів рівня врожаю для чотирьох різних наборів значень чинників впливу та індикаторів стану посівів. Показано, як нечіткі значення чинників та індикаторів у різному ступені впливають на оцінку рівня врожаю. **Висновки.** Описаний в даній роботі метод прогнозування дозволяє аналізувати, як різні набори значень чинників впливу та індикаторів стану посівів змінюють прогнозований рівень врожаю сільськогосподарських культур.

Ключові слова: дані дистанційного зондування Землі, прогнозування рівня врожаю, нечіткий опис чинників впливу, індекс NDVI, фрактальна розмірність.

Вступ

Попереднє оцінювання обсягів майбутнього врожаю (прогнозування врожайності) відіграє важливу роль у роботі сільгоспвиробників, яке дозволяє оцінити доходи і втрати, що очікуються, та здійснювати ефективне планування подальших робіт. В останні десятиліття для вирішення задач моніторингу стану сільськогосподарських угідь та прогнозування урожайності все більше застосовують данні дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1, 2]. Це обумовлено перш за все оперативністю та наочністю таких даних, що отримуються з великих територій супутниками ДЗЗ (Terra, Aqua, NOAA-20, Landsat 8, Sentinel-2). В умовах швидкої зміни вегетаційного стану сільськогосподарських культур супутники ДЗЗ дозволяють отримувати космічні знімки з просторовим розрізненням від 250 до 10 метрів та з періодичністю від 1 до 8 діб [3]. У теперішній час на борту супутників ДЗЗ розташовуються різноманітні датчики (сенсори), за допомогою яких отримуються дані про різні параметри атмосфери (аерозолі, температуру і вологість, характеристики хмарності, стан озонового шару, забруднення повітря і т.д.), а також про поверхню Землі (характеристики ґрунтового-рослинного покриву, температура, паводкова обстановка і т.д.). Також космічні знімки отримані в різних діапазонах довжин хвиль використовуються для визначення різних вегетаційних індексів, а також для розрахунку фрактальних розмірностей космічних зображень [4].

Для моніторингу стану сільськогосподарських культур та прогнозування їх врожаю використовують різноманітні методи, коротка характеристика яких наведена у роботі [5]. У роботі зазначено, що методи прогнозування врожаю розподіляються на методи, що ґрунтуються на оцінках фізичних особливостей навколишнього середовища (статистичний метод і метод механістичних моделей росту рослин), методи прямого оцінювання вмісту хлорофілу (наземні вимірювання цієї величини SPAD-датчиками) та методи, що використовують дані ДЗЗ (методи, що використовують регресійні моделі та вегетаційні індекси і методи, які базуються на оцінці стану рослинності, таких як LAI і біомаси). Кожен із зазначених методів має свої переваги і недоліки. Під час застосування статистичних методів необхідно мати велику кількість наземних вимірювань, що підвищує їх трудомісткість і складність виявлення залежностей у великих наборах даних. Побудова механістичних моделей також базується на великій кількості вхідних даних, крім того такі моделі, як правило, застосовують тільки для одного виду рослин. Велика кількість наземних вимірювань також необхідна під час застосування методу прямого оцінювання вмісту хлорофілу. Методи, які використовують регресійні моделі, стикаються з проблемою вибору типу функції, що адекватно описує процеси, що відбуваються. Така ж проблема виникає і під час застосування методів, які використовують вегетаційні індекси, що обумовлено їх великою кількістю [6] і вибором найкращого з них.

Крім того, для розрахунку вегетаційних індексів необхідні данні двох і більше спектральних діапазонів (багатоспектральні знімки), що ускладнює апаратуру отримання космічних знімків. Трудомісткими також є розрахунки індексів LAI і біомаси.

Всі зазначені методи прогнозування врожаю сільськогосподарських культур використовують накопичену інформацію про різноманітні чинники впливу на формування врожаю. Такі чинники можна розподілити на наступні типи [7]:

- природні (інтенсивність світла, температура навколишнього середовища, концентрація вуглекислого газу в атмосфері, вологість повітря, природна родючість ґрунту і т.п.);

- біологічні (органічні добрива, сорт насіння, гібриди);

- організаційно-техногенні (обробка ґрунту, терміни і способи посіву та посадки, мінеральні добрива, меліорація, засоби захисту рослин).

Зазначені вище природні чинники можна віднести до об'єктивних чинників, що не залежать від діяльності людини, а біологічні та організаційно-техногенні – до суб'єктивних чинників. Під час прогнозування рівня врожаю будемо вважати, що всі суб'єктивні чинники можуть або виконуватися, або не виконуватися, або виконуватися частково. Об'єктивні (природно-кліматичні) чинники передбачити не можливо і тому їх прогнозування може відбуватися тільки на основі експертних даних. При цьому експертиза може розглядатися в нечіткій постановці. Тому виникає необхідність розв'язання задачі оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур за прогнозованими значеннями чинників, що на нього впливають в нечіткій постановці.

Наявність великої кількості методів прогнозування врожаю, а також великий вплив на результат прогнозу об'єктивних чинників, які дуже важко врахувати під час оцінки врожайності, показує, що задача ефективного прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур є актуальною і до кінця не розв'язаною.

При оцінці рівня врожаю сільськогосподарських культур дані дистанційного зондування можуть використовуватися для отримання чисельних значень чинників впливу та індикаторів стану посівів.

Метою статті є обґрунтування прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур при нечіткому опису чинників, що на нього впливають, та індикаторів стану посівів.

Метод прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур

Оцінка рівня врожаю сільськогосподарських культур заснована на врахуванні чинників впливу на врожайність та індикаторів стану посівів, що описуються за допомогою теорії нечітких множин. Це обумовлено тим, що чисельні значення чинників та індикаторів визначаються в умовах відсутності необхідної статистики про ступінь їх впливу на врожай. Крім того, різні чинники у різному ступені впливають на врожай сільськогосподарських культур, а їх спільний вплив дуже складно оцінювати під час прийняття

рішення про величину врожаю. Певні чисельні значення цих чинників можуть характеризувати різний рівень врожаю. Тому порівняльна оцінка декількох рівнів врожаю сільськогосподарських культур пов'язана з постановкою та розв'язанням багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Під час розв'язання цієї задачі, застосування методу аналізу ієрархій, який розглядається в [8], дозволяє у якості критеріїв оптимізації використовувати відповідні чинники (як кількісні так і якісні), що впливають на врожай. Застосування інших методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, таких, як методи виділення основного критерію, формування узагальненого критерію і послідовних поступок, обмежено тим, що формування основного або складання узагальненого критерію, а також зведення їх виміру до однієї шкали викликає дуже великі труднощі.

На підставі розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі методом аналізу ієрархій розроблено метод прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів. Спрощена структурна схема методу наведена на рис. 1. Розглянемо застосування запропонованого методу для прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур при різних значеннях і комбінаціях чинників впливу та індикаторів стану посівів. На початку визначимо, чинники, що впливають на рівень врожаю.

До біологічних чинників найчастіше відносять застосування органічних добрив, вибір сорту насіння, використання гібридів рослин, що пристосовані до умов клімату у і ґрунту. Також значну роль під час формування врожаю відіграють попередники, тобто культури, які були посіяні на цьому полі у попередній сезон. Органічні добрива значно впливають на водне і повітряне живлення рослин, тому їх застосування впливає на рівень врожаю. Не менше впливати на отримання високого врожаю може застосування високоякісних сортів насіння і гібридів рослин. Вибір сорту повинен залежати від місцевих ґрунтово-кліматичних умов і пристосований до виробничих умов. За рахунок цього можна підвищити рівень врожаю на 15-20% [7].

До організаційно-техногенних чинників відносять обробку ґрунту, терміни і способи посіву та посадки, застосування мінеральних добрив, меліорацію, використання засобів захисту рослин. Обробка ґрунту спрямована на створення сприятливих умов для зростання і розвитку кореневої системи рослин, накопичення вологи, а також на боротьбу з бур'янами. Для отримання високого врожаю здійснюються заходи щодо кращого з агротехнічної точки зору укладене насіння в ґрунт та дотримання найбільш сприятливих для даної місцевості термінів посіву і посадки. Проведення цих робіт в неоптимальні терміни призводить до істотного зниження врожаю. Внесення мінеральних добрив здійснюється з урахуванням наявних в кожному господарстві матеріалів агрохімічного обстеження земель і розміщення посівів на ґрунтах із сприятливою реакцією на них ґрунтового середовища.

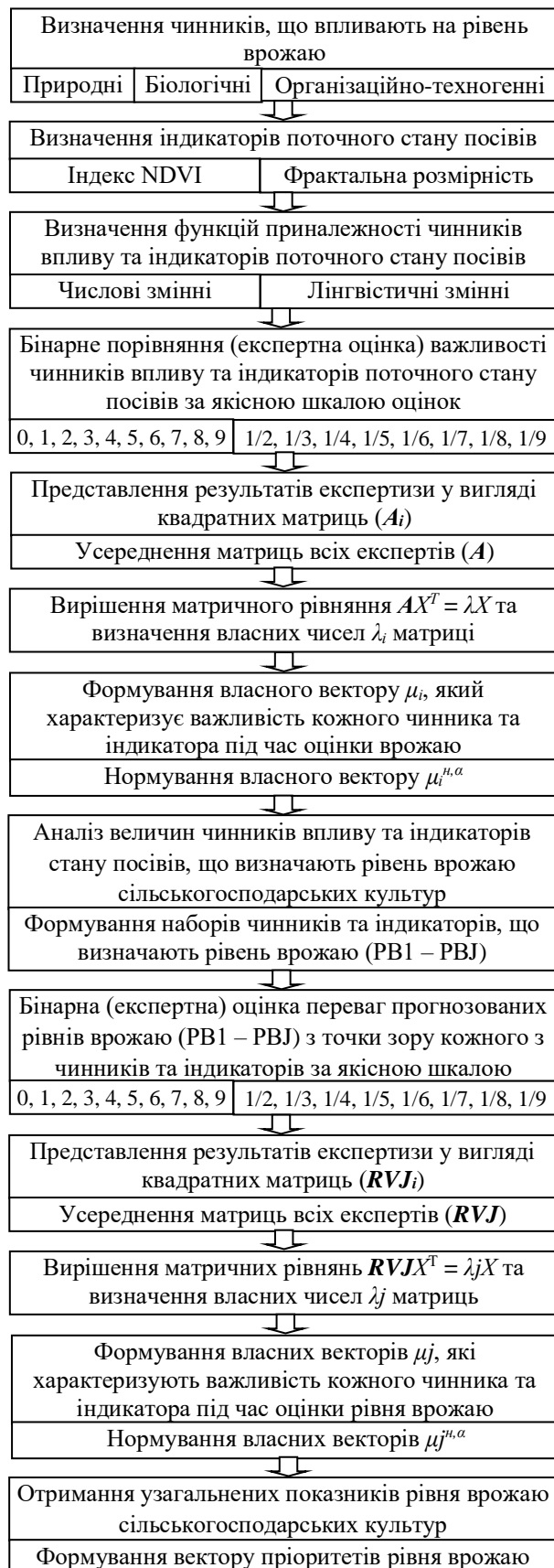


Рис. 1. Спрощена структурна схема методу прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур

Застосування мінеральних добрив також залежить від фінансових спроможностей господарств. Підвищення врожаю і якості сільськогосподарської

продукції також забезпечується проведенням поливу посівів згідно агротехнічним вимогам та своєчасною боротьбою з шкідниками і хворобами сільськогосподарських культур. Об'єктивні (природно-кліматичні) чинники передбачити не можливо і тому їх прогнозування може відбуватися тільки на основі експертних даних. Такі чинники у першу чергу впливають на швидкість та якість процесу фотосинтезу сільськогосподарських культур.

У роботі [9] визначені основні природні (зовнішні) чинники, що впливають процес фотосинтезу рослин, і проведена оцінка його швидкості при нечіткому описі таких чинників. При цьому до зовнішніх чинників у роботі [9] віднесено: інтенсивність світла, що потрапляє на рослини, тобто кількість світла необхідне рослинам для фотосинтезу; температуру навколишнього середовища; концентрація (вміст) вуглекислого газу в атмосфері поблизу рослини; вологість повітря. Крім того, на рівень врожаю впливає природна родючість ґрунту на якому здійснюється сільськогосподарська діяльність. Тому цей чинник також необхідно враховувати під час прийняття рішення про рівень врожаю.

Коротку характеристику природних чинників впливу та індикаторів процесу фотосинтезу розглянуто у [9]. Всі вони мають числові значення і по різному впливають на оцінку рівня врожаю.

При низьких значеннях інтенсивності світла швидкість фотосинтезу невелика і зростає прямо пропорційно з її збільшенням. Однак, при подальшому збільшенні інтенсивності світла наростання швидкості стає все менше і менше, а при значеннях близько 10 000 люкс вона вже не впливає на швидкість фотосинтезу. Освітлення в яскравий літній, сонячний день відповідає 100 000 люкс і в природних умовах висвітлювати рослина сильніше не має сенсу.

Найбільш сприятливою для фотосинтезу вважають температуру 25° С, нижня температурна межа, при якій може здійснюватися фотосинтез, близько 5° С. При підвищенні температури на 10° С інтенсивність фотосинтезу приблизно подвоюється. Але, посилення фотосинтезу відбувається тільки до температури 30-35° С. Подальше підвищення температури призводить до зменшення фотосинтезу, а при 40-45° С він припиняється і при подальшому підвищенні температури знижується.

Вуглекислий газ в сучасній атмосфері має концентрацію в середньому 0,03%. Ефективність фотосинтезу у всіх видів рослин буде зростати з підвищенням концентрації вуглекислого газу від 0,3% до 0,5%. Прийнято вважати, що оптимальна концентрація вуглекислого газу залежить від виду рослин, а її середнє значення становить 0,1%.

При нестачі вологості повітря (8-12%) сповільнюється процес проникнення вуглекислого газу, а це призводить до зменшення швидкості фотосинтезу. Надмірне зволоження також негативно позначається на інтенсивності фотосинтезу, вуглекислий газ не може проникнути всередину листа. Оптимальна величина відносної вологості, необхідної для фотосинтезу, становить 50-80%.

Для оцінки якості і родючості ґрунтів використовують бонітеровку. Бонітет ґрунтів – показник їх якості, виражений у балах по відношенню до ґрунту з найбільш високою потенційною родючістю, бал якої приймається звичайно рівним 100 [10]. Родючість орних земель оцінюється в 25-35 балів.

Також для оцінки рівня врожаю доцільно визначати індикатори поточного стану посівів (спеціальні числові показники), які дозволяють оперативного контролювати процес фотосинтезу рослин. До таких індикаторів у роботі [9] віднесено: індекс NDVI та фрактальну розмірність.

З великої кількості вегетаційних індексів [6] найбільше розповсюдження отримав нормалізований вегетаційний індекс NDVI, який змінюється в межах від -1 до 1. Негативні значення відповідають водним поверхням, будівлям, горам і т. д. Для відкритого ґрунту значення індексу змінюються від 0,1 до 0,2, а для рослинності – завжди від 0,2 до 1. Як правило, значення від 0,2 до 0,4 відповідають території з розрідженою рослинністю, для помірної рослинності – від 0,4 до 0,6, для густої – вище 0,6. У роботі [3] наведено, що під час обробки цифрових зображень посівів кукурудзи середні індекси NDVI склали: станом на 16.06.2018 – NDVI = 0,688, станом на 09.07.2018 – NDVI = 0,770, станом на 29.07.2018 – NDVI = 0,662.

Фрактальна розмірність є дробовою величиною, яка характеризує складність (порізаність) форми, яка заповнює простір. При аналізі цифрових зображень фрактальна розмірність (D) змінюється в межах від 2,0 до 3,0. В роботі [4] показано, що при обробці цифрових зображень посівів кукурудзи для «вікна» розміром 16x16 пікселів середні значення фрактальних розмірностей дорівнюють: $D = 2,922$ (станом на 16.06.2018), $D = 2,946$ (станом на 09.07.2018), $D = 2,910$ (станом на 29.07.2018).

Таким чином, на рівень врожаю впливає сукупність чинників, як суб'єктивних, так і об'єктивних. Також всі розглянуті чинники та індикатори можуть мати різні величини, які змінюються у часі, і впливати на рівень врожай як позитивно, так і негативно. При цьому чинники доповнюють один одного і нелінійно впливають на рівень врожаю. Крім того, статистичні дані про чинники впливу та індикатори стану посівів є обмеженими. Тому в умовах апріорної невизначеності, прийняття рішення, щодо оцінки рівня врожаю сільськогосподарських культур доцільно здійснювати на основі проведення експертизи з використанням нечітких множин і обробки експертних даних.

Підхід до формалізації поняття нечіткої множини полягає в узагальненні поняття приналежності [11]. Нечіткі множини є природним узагальненням звичайних множин, при відмові від бінарного характеру цієї функції і припущенні, що вона може приймати будь-які значення на відрізьку від 0 до 1. В теорії нечітких множин характеристична функція називається функцією приналежності, а її значення $\mu_A(x)$ – ступенем приналежності елемента x нечіткій множині A . Підхід до проведення експертизи в умовах нечіткої постановки завдання і обробки отриманих даних описаний в [12].

Подальший етап роботи методу спрямований на визначення функцій приналежності чинників впливу та індикаторів поточного стану посівів.

Як зазначалося вище, біологічні та організаційно-техногенні чинники, тобто суб'єктивні чинники, під час прийняття рішення будемо вважати якісними чинниками і оцінювати за допомогою лінгвістичних змінних. Це обумовлено тим, що вони залежать від діяльності людини, і не є випадковими, вони можуть або виконуватися, або не виконуватися, або виконуватися частково. Але не враховувати їх під час прийняття рішення необхідно, тому що вони значно впливають на рівень врожаю. На основі експертних даних будуть прийматися рішення про ступень виконання цих чинників, але рішення буде прийматися не за окремими біологічними та організаційно-техногенними чинниками, а за комплексним їх виконанням.

Згідно [11, 12] під лінгвістичною змінною розуміють кортеж

$$\langle \beta, T(\beta), G, M \rangle,$$

де β – назва лінгвістичної змінної; $T(\beta)$ – термножина лінгвістичної змінної, елементи якої γ_i , $i = 1, \dots, n$, є назвою нечіткої змінної; G – синтаксичне правило, яке породжує назву нечіткої змінної $\gamma \in T(\beta)$, як вербальних значень лінгвістичної змінної; M – синтаксичне правило, яке ставить у відповідність кожній нечіткій змінній $\gamma \in T(\beta)$ нечітку підмножину $A(\gamma) = \{\mu_{A(\gamma)}(x)/x\}$, $x \in X$, $\mu_{A(\gamma)}(x)$ – значення функції приналежності нечіткої підмножини $A(\gamma)$, X – область визначення нечіткої змінної.

Відносно нечіткого показника «біологічні чинники» може бути визначена лінгвістична змінна β_δ – «виконання», а термножина $T(\beta_\delta)$ може визначатися двома нечіткими змінними: $\gamma_{\delta 1}$ – «виконуються» та $\gamma_{\delta 2}$ – «не виконуються». Для нечіткого показника «організаційно-техногенні чинники» також може бути визначена лінгвістична змінна β_{om} – «виконання», а термножина $T(\beta_{om})$ також може визначатися двома нечіткими змінними: $\gamma_{om 1}$ – «виконуються» та $\gamma_{om 2}$ – «не виконуються».

Визначення функцій приналежностей нечітких змінних $\gamma_{\delta 1}$, $\gamma_{\delta 2}$ лінгвістичної змінної β_δ та нечітких змінних $\gamma_{om 1}$, $\gamma_{om 2}$ лінгвістичної змінної β_{om} досягається шляхом постановки експертизи та обробки експертних даних. Кожний i -й експерт, $i = 1, \dots, I$, висловлює своє суб'єктивне судження про таке: у скільки разів значення функції належності $\mu_{A(\gamma_{\delta 1})}(x_n)$, наприклад, розглядається нечітка підмножина $A(\gamma_{\delta 1})$ нечіткої змінної $\gamma_{\delta 1}$ більше значення функції приналежності $\mu_{A(\gamma_{\delta 1})}(x_m)$ $x_n, x_m \in X$; $n = 1, \dots, N$, $m = 1, \dots, M$, X – область визначення лінгвістичної змінної β_δ . Таке судження експерт подає, виходячи із дев'ятибальної шкали оцінок, яку наведено у [12].

При визначенні значень функції приналежності експерти керуються думкою: у скільки разів обраний чинник впливу і індикатор стану посівів більш істотний (вагоміший) по відношенню до іншого чинника впливу та індикатора з точки зору можливості оцінки рівня врожаю. При цьому, якщо n -ий і m -ий чинники впливу або індикатори (A_n і A_m) немає сенсу порівнювати, тобто вони не порівнювані, то оцінка за якісною шкалою дорівнює 0. За умови, що

n -ий і m -ий чинники або індикатори однаково важливі, то оцінка дорівнює 1. У разі якщо експерт вважає, що n -ий чинник або індикатор незначно важливіший, ніж m -ий, то оцінка дорівнює 3. Якщо ж n -ий чинник або індикатор просто важливіше m -го – оцінці присвоюється значення 5. У разі, коли n -ий чинник або індикатор значно важливіший m -го – оцінка має значення 7. Експерт присвоює оцінці значення 9, якщо він вважає, що n -ий чинник або індикатор за своєю значимістю абсолютно перевершує m -ий. Для зворотного порівняння m -го чинника або індикатора з n -им (A_m і A_n) експерт використовує зворотні величини: 1, 1/3, ..., 1/9. Значення оцінок 2, 4, 6, 8 та їх зворотні величини використовуються для полегшення компромісів між судженнями, які відрізняються незначно.

Графічне представлення функцій приналежності нечітких підмножин, які відповідають зазначеним лінгвістичним змінним, наведено на рис. 2.

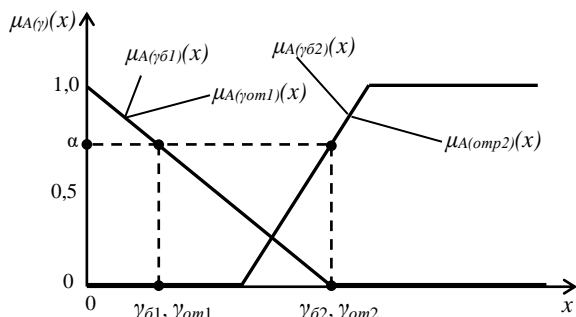


Рис. 2. Функція приналежності лінгвістичних змінних $\gamma_{\beta 1}$, $\gamma_{\beta 2}$ і $\gamma_{\text{om}1}$, $\gamma_{\text{om}2}$

На рис. 2 видно, що функції приналежності двох лінгвістичних змінних однаково і мають декілька характерних областей, на яких експерти приймають відповідні рушення. Так для використання експертами функцій приналежності нечітких змінних на них визначається рівень α , якому будуть відповідати чіткі множини. Виходячи зі змісту чинників впливу, експерт вибирає $\alpha \geq \alpha_{\text{нд}}$, де $\alpha_{\text{нд}}$ – рівень необхідної довіри прогнозних значень чинників впливу на рівень врожаю, наприклад, $\alpha_{\text{нд}}$ може обраний 0,6. Якщо експерт вибирає значення функції приналежності чинника впливу, які знаходяться на відрізьку від 0 до $\gamma_{\beta 1}$, $\gamma_{\text{om}1}$ та праворуч від $\gamma_{\beta 2}$, $\gamma_{\text{om}2}$, тобто $\alpha_{\text{нд}} > 0,6$, то він визначає чітку α -рівневу підмножину. На відрізьку від $\gamma_{\beta 1}$, $\gamma_{\text{om}1}$ до $\gamma_{\beta 2}$, $\gamma_{\text{om}2}$ експертиза проводиться в умовах нечіткого представлення чинників впливу.

Природно-кліматичні (об’єктивні) чинники мають числові значення і експертиза буда проводиться окремо для кожного чинника впливу. При цьому кожен експерт висловлює свою думку про прогнозовані значення чинників впливу і індикаторів у вигляді нечіткого трикутного числа, функція приналежності якого має вигляд [11]

$$\mu_{A_k}(x) = \begin{cases} [x - (A_k - \Delta_1)] / \Delta_1, & A_k - \Delta_1 \leq x \leq A_k, \\ [(A_k - \Delta_2) - x] / \Delta_2, & A_k \leq x \leq A_k + \Delta_2, \\ 0, & 0 \leq A_k - \Delta_1, x \geq A_k + \Delta_2. \end{cases} \quad (1)$$

Графічне представлення такої функції приналежності нечітких підмножин наведено на рис. 3.

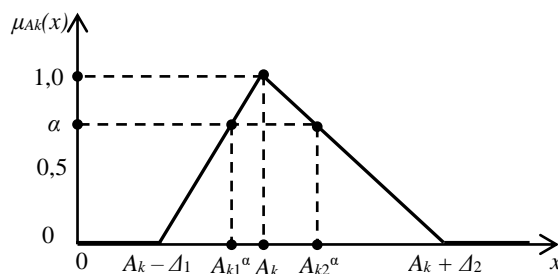


Рис. 3. Представлення значення чинника впливу та індикатора нечітким трикутним числом

Як видно на рис. 3, при виборі функції приналежності у вигляді нечіткого трикутного числа, кожен експерт висловлює свою суб’єктивну думку у вигляді трьох значень про кожен чинник впливу і індикатор стану посівів: від $(A_k - \Delta_1)$ – негативна оцінка (зростаюча ділянка трикутника); A_k – оцінка, найбільш очікувана (вершина трикутника); до $(A_k + \Delta_2)$ – позитивна оцінка (спадаюча ділянка трикутника). Таким чином, кожен експерт свою суб’єктивну думку про прогнозовані значення чинників впливу (інтенсивність світла, що потрапляє на рослини (A_1); температуру навколишнього середовища (A_2); концентрація вуглекислого газу в атмосфері поблизу рослини (A_3); вологість повітря (A_4); природна родючість ґрунту (A_5)), а також індикаторів стану посівів (індекс NDVI (A_6) та фрактальну розмірність (A_7)) висловлює в нечітких оцінках прогнозних значень.

Аналіз нечіткого прогнозованого опису значень чинників впливу на рівень врожаю показує, що чинники $A_1 - A_5$ мають чітко виражену кількісну природу і вимірюються у відповідних величинах (люксах, градусах Цельсія, відсотках і балах). Індикатори стану посівів (A_6 і A_7) також мають кількісний нечіткий прогнозований опис – індекс NDVI може змінюватися від 0 до 1, а фрактальна розмірність від 2 до 3. Чинники, які мають якісну природу (біологічні чинники (A_8) та організаційно-техногенні чинники (A_9)), прогнозуються на підставі введення до розгляду відповідних лінгвістичних змінних.

На наступному етапі роботи методу, з використанням апріорної інформації про основні чинники та індикатори, експерти проводять попарне (бінарні) порівняння важливості чинників впливу та індикаторів стану посівів ($A_1 - A_9$) на рівень врожаю. При цьому, якщо один чинник або індикатор оцінюється в s разів вагомніше, ніж інший, то другий чинник оцінюється в $1/s$ разів вагомніше, ніж перший, і т.д. Як зазначалося вище, s може приймати значення від 1 до 9 (дев’ятибальна шкала). В якості експертів виступатимуть автори роботи.

Коротко розглянемо доводи експертів при обґрунтуванні вагомості чинників впливу та індикаторів стану рослин на оцінку рівня врожаю.

Порівнюючи чинники впливу та індикатори самі з собою, їх вагомість рівна, тому значення A_{11} , A_{22} , A_{33} , A_{44} , A_{55} , A_{66} , A_{77} , A_{88} , A_{99} дорівнюють одини-

ці. Також існують чинники впливу та індикатори, які пов'язані між собою, і, на думку експертів, однаково впливають на оцінку рівня врожаю, тому їх вагомість один відносно одного також дорівнюється одиниці. До таких чинників впливу відносяться: інтенсивність світла і температура (значення A_{12} і A_{21}), що обумовлено фотохімічною і ферментною системами рослин, а також концентрація вуглекислого газу і вологість повітря (значення A_{34} і A_{43}). Крім того, на думку експертів, родючість ґрунту і біологічні та організаційно-техногенні чинники взаємопов'язані між собою і однаково впливають на рівень врожаю (значення A_{58} , A_{59} , A_{89} і A_{85} , A_{95} , A_{98}), тому що на них впливають результати дії людини, а їх значення дорівнюють одиниці. Індикатори є пов'язаними між собою і однаково характеризують стан посівів, тому експерти також вважають їх рівними одиниці (значення A_{67} і A_{76}). Інші фактори, на думку експертів, в різному ступені (важливіше) впливають на оцінку рівня врожаю.

При оцінці рівня врожаю інтенсивність світла значно важливіше концентрації вуглекислого газу, тому що в реальних умовах концентрація вуглекислого газу в повітрі змінюється незначно, а освітленість може значно змінюватися в залежності від погодних умов і часу доби, тому значення A_{13} дорівнює 7, а значення A_{31} відповідно – 1/7. Також інтенсивність світла просто важливіше вологості повітря, так як при хорошій освітленості процес фотосинтезу йде швидше, ніж при високій вологості, але слабкому освітленні. З урахуванням цього значення A_{14} дорівнює 5, а значення A_{41} – 1/5.

При оцінці рівня врожаю, за думкою експертів, температура повітря значно важливіше такого чинника впливу, як концентрація вуглекислого газу і просто важливіше, чим вологість, тому значення A_{32} і A_{42} дорівнюють 7 і 5, відповідно, а значення A_{23} і A_{24} – 1/7 і 1/5. Це обумовлено тим, що при високих температурах процес фотосинтезу рослин збільшується, але під час перевищення температури 25 °C ефективність фотосинтезу перестає зростати, відбувається закривання пор, і рослини починають економити воду. Тому вологість повітря менш важлива, ніж температура. Закриття пор при збільшенні температури не дозволяє вуглекислому газу потрапити в зелені клітини рослини, тому його концентрація в рослині не змінюється і навіть зменшується, тобто при високій температурі спостерігається нестача вуглекислого газу. Природна родючість ґрунту пов'язана з її початковими генетичними особливостями і у ґрунті рослини знаходять усе необхідне для життя – воду, живлення, повітря, які поповнюються з навколишнього середовища, тому концентрація вуглекислого газу в атмосфері, вологість повітря, інтенсивність світла і температура є просто важливішою ніж природна родючість ґрунту (відповідно значення A_{15} , A_{25} , A_{35} і A_{45} дорівнюють 5, а значення A_{51} , A_{52} , A_{53} і A_{54} – 1/5). Також, за думкою експертів, природні чинники (інтенсивність світла, температура навколишнього середовища, концентрація вуглекислого газу в атмосфері, вологість повітря) не значно, але важливіші за біологічні та організаційно-

техногенні чинники. Тому значення A_{18} – A_{48} і A_{19} – A_{49} дорівнюють 2, а значення A_{81} – A_{84} і A_{91} – A_{94} – 1/2.

Індикатори стану рослин, отримані з використанням дистанційних засобів зондування, на думку експертів, є важливішими при оцінці рівня врожаю, ніж природні, біологічні та організаційно-техногенні чинники впливу, хоча вони і дають лише відносні оцінки характеристик стану рослин. Це обумовлено тим, що індикатори дозволяють оперативному отримувати оціночні значення стану рослин і можуть одночасно охоплювати великі площі. Крім того, вони можуть бути отримані швидше і точніше, ніж чинники впливу. Виходячи з цього, індекс NDVI значно важливіший всіх чинників впливу, і значення A_{61} – A_{65} і A_{68} , A_{69} дорівнюють 7, а значення A_{16} – A_{56} і A_{86} , A_{96} – 1/7. Однак, індикатори стану рослин при їх визначенні необхідно калібрувати і врахувати похибки через погодні умови, а також необхідне порівнювання отриманих результатів з даними тестових еталонних ділянок, які враховують сезонні еколого-кліматичні показники на момент отримання даних. Тому фрактальна розмірність просто важливіша всіх чинників впливу, тому значення A_{71} – A_{75} і A_{78} , A_{79} дорівнюють 5, а значення A_{17} – A_{57} і A_{87} , A_{97} – 1/5. Різниця у значеннях важливості індикаторів стану посівів над чинниками впливу також обумовлено, тим, що в даний час існують накопичені бази індексів NDVI для різних рослин, що розвиваються в різних умовах, чого поки немає для фрактальної розмірності.

Результати порівняння за дев'ятибальною шкалою експерти подають у вигляді матриць $A_i = \|a_{nm}(i)\|$, $i = 1, \dots, I$; $n = 1, \dots, N$; $m = 1, \dots, M$. Потім матриці A_i усереднюються $A = \|a_{nm}\|$. Усереднення може проводитися з урахуванням вагових коефіцієнтів експертів, які залежать від їхнього досвіду. Результати проведення експертизи (усереднена матриця), що були розглянуті вище, мають вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1/7 & 1/5 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 1/7 & 7 & 1 & 1 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1 & 1/5 & 7 & 5 & 2 & 2 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 1 & 7 & 5 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1 & 1 & 1/7 & 1/7 \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 7 & 5 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 7 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Якщо отримана матриця A є квадратною, то вирішуючи матричне рівняння

$$AX^T = \lambda X, \quad (2)$$

то можна визначити власні числа λ матриці, як корені характеристичного рівняння

$$A - \lambda E = 0, \quad (3)$$

де E – одинична матриця.

При цьому кожному власному числу λ буде відповідати власний вектор X . Якщо матриця A є невід'ємною, зворотносиметричною та узгодженою,

то рівняння $A - \lambda E = 0$ має один корінь $\lambda = \lambda_{\max} = k$, якому відповідає єдиний власний вектор X .

У разі подання суб'єктивних суджень експертів у вигляді такої матриці, рішення матричного рівняння

$$AX^T = kX \quad (4)$$

буде визначати власний вектор $X = \{\mu_A(x)/x\}$, $x \in X$, а числова міра розбіжності λ_{\max} і k визначатиме числову міру узгодженості суджень експертів.

$$\text{Якщо } \sum_{i=1}^k \mu_A(x_i) = 1, \text{ то}$$

$$\sum_{i=1}^k \mu_A(x_i) / \mu_A(x_j) = 1 / \mu_A(x_j),$$

і, відповідно до рівняння

$$A\mu^T = \lambda_{\max}\mu \quad (5)$$

можна сформувати вектор $\mu = \{\mu_A(x_j)\}$, $j = 1, \dots, k$.

На наступному етапі методу, в результаті рішення матричного рівняння (5), отримуємо власний вектор, який має константи

$$\mu_i = \{0,115; 0,049; 0,065; 0,074; 0,241; 0,020; 0,027; 0,088; 0,088\}.$$

Нормований вектор

Таблиця 1 – Значення чинників впливу та індикаторів стану посівів

Рівень врожаю	Інтенсивність світла, $\times 10^3$, лк	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Концентрація вуглекислого газу, %	Вологість повітря, %	Родючість ґрунту, бал	Індекс NDVI, 0,0 – 1,0	Фрактальна розмірність, 2,0 – 3,0	Біологічні	Організаційно-техногенні
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
PB 1	9 – 11	20 – 30	0,1 – 0,3	60 – 80	25 – 30	0,6 – 0,7	2,91 – 2,95	вик.	не вик.
PB 2	8 – 11	15 – 25	0,1 – 0,2	50 – 70	30 – 35	0,5 – 0,6	2,92 – 2,96	не вик.	вик.
PB 3	7 – 10	10 – 20	0,05 – 0,15	40 – 60	10 – 15	0,5 – 0,6	2,90 – 2,92	не вик.	не вик.
PB 4	7 – 9	25 – 35	0,03 – 0,1	30 – 50	15 – 20	0,6 – 0,7	2,91 – 2,94	вик.	вик.

Як видно з аналізу даних табл. 1, діапазони зміни значень чинників впливу та індикаторів стану посівів всіх чотирьох комбінацій перетинаються, і визначити рівень врожаю тільки з аналізу цих даних стає неможливо. Тому при визначенні рівня врожаю будемо використовувати експертну оцінку про важливість кожного чинника впливу та індикатора стану посівів для кожного з чотирьох рівнів врожаю.

З використанням методу аналізу ієрархій [12], проведемо попарну (бінарну) оцінку переваг прогнозованих рівнів врожаю з точки зору кожного, з розглянутих вище чинників впливу і індикаторів стану посівів, що складає наступний етап методу. Під час оцінки в якості експертів виступатимуть автори роботи. Коротко розглянемо доводи експертів при обґрунтуванні вагомості рівнів врожаю (PB1 – PB4) для кожного чинників впливу та індикаторів стану рослин. Бінарні порівняння експерти проводять, керуючись думкою: як окремо кожен чинник впливу та індикатор стану посівів визначає один з чотирьох прогнозованих рівнів врожаю. При цьому експерти також використовують дев'яти бальну шкалу, яку було описано вище.

$$\mu_i^{H,\alpha} = \mu_i / \sum_{i=1}^9 \mu_i, \quad (6)$$

має вигляд

$$\mu_i^{H,\alpha} = \{0,150; 0,064; 0,085; 0,096; 0,314; 0,026; 0,035; 0,115; 0,115\}.$$

Розрахований вектор $\mu_i^{H,\alpha}$ відповідає прийнятому для всіх чинників впливу та індикаторів стану посівів рівня α функції приналежності. Таким чином, формування власного вектору характеризує важливість кожного чинника впливу або індикатора стану посівів під час оцінки рівня врожаю.

На наступному етапі методу аналізуються діапазони змін величин чинників впливу та індикаторів стану посівів, що визначають рівень врожаю для вибраного регіону вирощування сільськогосподарських культур. Формується декілька наборів чинників впливу та індикаторів стану посівів, які можуть буди під час оцінки рівня врожаю. Для прикладу, у табл. 1 наведено діапазони зміни значень чинників впливу та індикаторів стану посівів для чотирьох різних їх комбінацій при яких буде проводитися оцінка рівня врожаю (PB1 – PB4).

Таким чином, буде прийматися рішення при якій комбінації чинників впливу та індикаторів стану посівів буде найбільший рівень врожаю.

Порівнюючи рівні врожаю самі з собою, їх вагомість рівна, тому значення RV_{11} , RV_{12} , RV_{13} , RV_{14} – RV_{91} , RV_{92} , RV_{93} , RV_{94} дорівнюють одиниці.

При аналізі першого чинника впливу (інтенсивність світла) експерти роблять висновок, що PB1 в різному ступені, але є вагомим, ніж PB2, PB3 і PB4, так як PB1 характеризується найбільшими значеннями інтенсивності світла, тому значення RV_{12} , RV_{13} і RV_{14} мають наступні величини 3, 5 і 7, відповідно, а значення RV_{21} , RV_{31} і RV_{41} – 1/3, 1/5 і 1/7. Також PB2 за цим чинником має незначну важливість в порівнянні з PB3 і просту важливість в порівнянні з PB4, через більші значення верхньої і нижньої межі інтенсивності світла (значення RV_{23} і RV_{24} дорівнюють 3 і 5, відповідно, а значення RV_{32} і RV_{42} – 1/3 і 1/5). Рівень врожаю PB3 за цим чинником не значно важливіший з PB4, тому що у PB3 верхня межа інтенсивності світла не значно, але більша на 1×10^3 лк, і значення $RV_{34} = 2$, а значення $RV_{43} = 1/2$.

Дослідження показують, що рівень врожаю сильно залежить від температури повітря (другий чинник), але найбільш сприятливою для фотосинтезу

вважають температуру 25 °С. У зв'язку з цим РВ1 не значно важливіше РВ4 ($RV_{214} = 3, RV_{241} = 1/3$), просто важливіше РВ2 ($RV_{212} = 5, RV_{221} = 1/5$) і абсолютно важливіше РВ3 ($RV_{213} = 9, RV_{231} = 1/9$). РВ4 за цим чинником є важливішим в порівнянні з РВ2 ($RV_{242} = 5, RV_{224} = 1/5$) і значно важливішим в порівнянні з РВ3 ($RV_{243} = 7, RV_{234} = 1/7$), через те, що процес фотосинтезу відбувається швидше для температур 30-35 °С, ніж при низьких температурах. Також, тому що температура для РВ2 вища і ближча до 25 °С у порівнянні з РВ3, то значення $RV_{223} = 5$, а значення $RV_{232} = 1/5$.

Аналізуючи третій чинник впливу, можна сказати, що концентрація вуглекислого газу РВ1 і РВ2 в різному ступені, але є вагомим, ніж РВ3 і РВ4, тому що ефективність фотосинтезу у всіх видів рослин зростає з підвищенням концентрації вуглекислого газу до 0,5%. У зв'язку з цим, на думку експертів, значення RV_{313} і RV_{323} дорівнюють 5 і 3, відповідно, ($RV_{331} = 1/5, RV_{332} = 1/3$), а значення RV_{314} і RV_{324} дорівнюють 7 і 5, відповідно, ($RV_{341} = 1/7, RV_{342} = 1/5$). Між собою РВ1 і РВ2 за концентрацію вуглекислого газу відрізняються не значно, тому значення RV_{312} дорівнює 2, а значення $RV_{321} = 1/2$. Між собою РВ3 і РВ4 за концентрацію вуглекислого газу відрізняються не значно, тому значення RV_{343} дорівнює 4, а значення $RV_{334} = 1/4$.

За четвертим чинником впливу (вологість повітря) РВ1 і РВ2 в різному ступені, але є більш важливими, ніж РВ3 і РВ4, тому значення RV_{413} і RV_{423} дорівнюють 7 і 5, відповідно, ($RV_{431} = 1/7, RV_{432} = 1/5$), а значення RV_{414} і RV_{424} дорівнюють 9 і 7, відповідно, ($RV_{441} = 1/9, RV_{442} = 1/7$), що обумовлено більш низькими значеннями вологості для РВ3 і РВ4. За цим же чинником РВ1 не значно важливіший у порівнянні з РВ2, тому значення $RV_{412} = 3$, а значення $RV_{421} = 1/3$. РВ3 за вологість повітря важливіше ніж РВ4, тому $RV_{434} = 5$, а $RV_{443} = 1/5$, через менші значення нижньої і верхньої межі вологості для РВ4.

За п'ятим чинником (природна родючість ґрунту) РВ2 є просто важливішим, ніж РВ1, значно важливішим, ніж РВ4, і абсолютно важливішим у порівнянні з РВ3, тому що РВ2 має найбільший бал бонітету ґрунту. Відповідно, за думкою експертів, значення RV_{521} дорівнює 5, $RV_{523} = 9$, і $RV_{524} = 7$, а зворотні величини відповідно дорівнюють $RV_{512} = 1/5, RV_{532} = 1/9$ і $RV_{542} = 1/7$. РВ1 за цим чинником є також значно важливішим, ніж РВ4, і абсолютно важливішим, ніж РВ3, відповідно $RV_{513} = 9$ і $RV_{514} = 7$, а $RV_{531} = 1/9$ і $RV_{541} = 1/7$. РВ4 за родючість ґрунту є просто важливішим, ніж РВ3, тому значення RV_{543} дорівнює 5, а значення $RV_{534} = 1/5$.

Як видно з табл. 1, індекс NDVI (перший індикатор стану посівів), для РВ1 і РВ4, а також РВ2 і РВ3 однакові, тому $RV_{614} = RV_{641} = 1$ і $RV_{623} = RV_{632} = 1$. Але, на думку експертів, за цим індикатором, РВ1 і РВ4 є просто важливішим, ніж РВ2 і РВ3, тому що індекс NDVI для РВ1 і РВ4 будуть більше, ніж РВ2 і РВ3. У зв'язку з цим $RV_{612} = RV_{613} = RV_{642} = RV_{643} = 5$, а $RV_{621} = RV_{631} = RV_{624} = RV_{634} = 1/5$.

Під час аналізу другого індикатора (фрактальної розмірності) експерти вважають, що РВ1 і РВ2 в різному ступені, але є вагомими, ніж РВ3 і РВ4, тому що у них діапазони змін фрактальних розмірностей є більшими. У зв'язку з цим значення $RV_{713} = RV_{723} = 5$ ($RV_{731} = RV_{732} = 1/5$), а значення $RV_{714} = RV_{724} = 3$ ($RV_{741} = RV_{742} = 1/3$). Діапазони змін фрактальних розмірностей для РВ1 і РВ2 не відрізняються, тому значення $RV_{712} = RV_{721} = 1$. Для РВ4 діапазон змін фрактальних розмірностей не значно, але більше ніж для РВ3, тому значення $RV_{743} = 4$, а значення $RV_{734} = 1/4$.

Як видно з табл. 1, біологічні чинники (перший лінгвістичний чинник) виконуються для РВ1 і РВ4 та не виконуються для РВ2 і РВ3, тому $RV_{814} = RV_{841} = 1$ і $RV_{823} = RV_{832} = 1$. Виконання біологічних чинників, на думку експертів, є абсолютно важливим, ніж їх не виконання, тому $RV_{812} = RV_{813} = RV_{842} = RV_{843} = 9$, а $RV_{821} = RV_{831} = RV_{824} = RV_{834} = 1/9$.

Таку ж думку експерти висловлюють і для організаційно-техногенних чинників (другий лінгвістичний чинник). У зв'язку з тим, що для РВ2 і РВ4 організаційно-техногенних чинники виконуються, а для РВ1 і РВ3 не виконуються (див. табл. 1), то $RV_{924} = RV_{942} = 1$ і $RV_{913} = RV_{931} = 1$. Також, на думку експертів, виконання організаційно-техногенних чинників, є абсолютно важливим, ніж їх не виконання, тому

$$RV_{921} = RV_{923} = RV_{941} = RV_{943} = 9,$$

$$RV_{912} = RV_{932} = RV_{914} = RV_{934} = 1/9.$$

Результати експертизи після усереднення представляються у вигляді квадратних матриць RVJ , де $J = 1, \dots, 9$, для розглянутих вище умов

$$RV1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV2 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 3 \\ 1/5 & 1 & 5 & 1/5 \\ 1/9 & 1/5 & 1 & 1/7 \\ 1/3 & 5 & 7 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV4 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 7 & 9 \\ 1/3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 5 \\ 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV5 = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 9 & 7 \\ 5 & 1 & 9 & 7 \\ 1/9 & 1/9 & 1 & 1/5 \\ 1/7 & 1/7 & 5 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV6 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 5 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/5 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/5 \\ 1 & 5 & 5 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV7 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/4 \\ 1/3 & 1/3 & 4 & 1 \end{pmatrix},$$

$$RV8 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 9 & 1 \\ 1/9 & 1 & 1 & 1/9 \\ 1/9 & 1 & 1 & 1/9 \\ 1 & 9 & 9 & 1 \end{pmatrix}, \quad RV9 = \begin{pmatrix} 1 & 1/9 & 1 & 1/9 \\ 9 & 1 & 9 & 1 \\ 1 & 1/9 & 1 & 1/9 \\ 9 & 1 & 9 & 1 \end{pmatrix}.$$

Після вирішення матричних рівнянь

$$RVJ\lambda^T = \lambda_j X$$

визначаються власні числа λ_j матриць і формуються власні вектори μ_j . Після нормування

$$\mu_j^{n,\alpha} = \mu_j / \sum_{i=1}^4 \mu_j, \quad (7)$$

нормовані вектора, які характеризують важливість кожного чинника та індикатора під час оцінки рівня врожаю, мають вигляд

$$\mu_1^{n,\alpha} = \{0,603; 0,223; 0,106; 0,068\};$$

$$\mu_2^{n,\alpha} = \{0,626; 0,092; 0,046; 0,237\};$$

$$\mu_3^{n,\alpha} = \{0,547; 0,285; 0,109; 0,059\};$$

$$\mu_4^{n,\alpha} = \{0,642; 0,234; 0,077; 0,046\};$$

$$\mu_5^{n,\alpha} = \{0,167; 0,720; 0,044; 0,069\};$$

$$\mu_6^{n,\alpha} = \{0,417; 0,083; 0,083; 0,417\};$$

$$\mu_7^{n,\alpha} = \{0,363; 0,363; 0,062; 0,212\};$$

$$\mu_8^{n,\alpha} = \{0,450; 0,050; 0,050; 0,450\};$$

$$\mu_9^{n,\alpha} = \{0,050; 0,450; 0,050; 0,450\}.$$

Таким чином, сформовані нормовані вектора характеризують важливість кожного чинника впливу та індикатора впливу для чотирьох умов (табл. 1) для яких оцінюється рівень врожаю.

На останньому етапі методу отримуються узагальнені показники рівня врожаю сільськогосподарських культур, під час якого реалізується принцип синтезу.

Згідно цього принципу, компонента вектору пріоритетів рівня врожаю визначається з використанням виразу

$$\mu_k^{n,\alpha} = \sum_{i=1}^9 \mu_{i,k}^{n,\alpha} \cdot \mu_i^{n,\alpha}, \quad (8)$$

де $k = 1, 2, 3, 4$ – номер рівня врожаю;

$\mu_{i,k}^{n,\alpha}$ – нормоване значення k -ої компоненти вектору пріоритету рівня врожаю за i -им чинником впливу або індикатором стану посівів, значення якого визначено α -рівневим чітким інтервалом функції приналежності;

$\mu_i^{n,\alpha}$ – нормоване значення i -ої компоненти вектору пріоритетів чинників впливу та індикаторів стану посівів, за якими приймається рішення про рівень врожаю, і значення яких визначено α -рівневим інтервалом.

Для підрахунку компоненти $\mu_k^{n,\alpha}$ дані сформованих нормованих векторів зручно представити в наступному вигляді

$$\mu_i^{n,\alpha} = \{0,150; 0,064; 0,085; 0,096; 0,314; 0,026; 0,035; 0,115; 0,115\};$$

$$\mu_{i,1n,\alpha} = \{0,603; 0,626; 0,547; 0,642; 0,167; 0,417; 0,363; 0,450; 0,050\};$$

$$\mu_{i,2}^{n,\alpha} = \{0,223; 0,092; 0,285; 0,234; 0,720; 0,083; 0,363; 0,050; 0,450\};$$

$$\mu_{i,3}^{n,\alpha} = \{0,106; 0,046; 0,109; 0,077; 0,044; 0,083; 0,062; 0,050; 0,050\};$$

$$\mu_{i,4}^{n,\alpha} = \{0,068; 0,237; 0,059; 0,046; 0,069; 0,417; 0,212; 0,450; 0,450\}.$$

За допомогою отриманих нормованих векторів і виразу (8) формується вектор пріоритетів рівня врожаю, який має вигляд

$$\mu_k^{n,\alpha} = \{0,372; 0,384; 0,065; 0,178\}.$$

Аналіз отриманого вектору пріоритетів показує, що найбільший рівень врожаю прогнозується для чисельних значень чинників впливу та індикаторів стану посівів, наведених у другому рядку табл. 1, – PB2. Близький до цього рівня врожаю прогнозується PB1 (чисельні значення чинників впливу і індикаторів представлено у першому рядку табл. 1), тому що він має незначно менше (на 0,012) значення у векторі пріоритетів. Найнижче значення прогнозованого рівня врожаю отримано для умов, представлених у третьому рядку табл. 1 (PB3), що свідчить про те, що зазначені в ньому чинники впливу та індикатори стану посівів не сприяють задовільному розвитку сільськогосподарських культур. Умови для PB4 (четвертий рядок в табл. 1) показують, що вони забезпечують нижчий у два рази прогнозований рівень врожаю у порівнянні з PB2 і PB1.

Таким чином, за результатами роботи розробленого методу приймається рішення, що найбільший рівень врожаю буде для умов, представлених у другому рядку табл. 1: інтенсивність світла – $(8 - 11) \times 10^3$ лк; температура повітря – $15 - 25^\circ\text{C}$; концентрація вуглекислого газу – $0,1 - 0,2\%$; вологість повітря – $50 - 70\%$; родючість ґрунту – $30 - 35$ балів; індекс NDVI – $0,5 - 0,6$; фрактальна розмірність – $2,92 - 2,96$; біологічні чинники – не виконуються, а організаційно-техногенні – виконуються.

Висновки

В умовах нестохастичної невизначеності чинників впливу та індикаторів стану посівів, оцінка рівня врожаю може відбуватися тільки на основі експертних даних, при цьому експертиза може розглядатися в нечіткій постановці.

Розроблено метод прогнозування рівня врожаю сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткого опису чинників впливу та індикаторів стану посівів. Під час розробки методу здійснювалася декомпозиція проблеми в ієрархію, яка мала три стадії. На першій стадії була сформована мета, яка досягається при вирішенні проблеми, – оцінка рівня врожаю. На другій стадії визначені, проаналізовані і описані чинники впливу та індекси стану посівів, за якими приймається рішення про рівень врожаю. На третій стадії визначений перелік альтернатив – рівнів врожаю (PB1 – PB4), які прогнозуються.

Особливістю запропонованого методу є те, що нечіткий опис може застосовуватися для чинників впливу, що визначаються, як кількісно, так і якісно. На основі такого опису за відомими наборами значень чинників впливу з урахуванням індексу NDVI і фрактальної розмірності (на практиці всі ці значення перетинаються) приймається рішення про рівень врожаю.

З використанням розробленого методу визначені величини (ступені) рівнів врожаю для чотирьох різних наборів значень чинників впливу та індикаторів стану посівів. Показано, як нечіткі значення чинників та індикаторів у різному ступені впливають на оцінку рівня врожаю.

Отримані за допомогою розробленого методу результати дозволяють аналізувати як різні набори

значень чинників впливу та індикаторів стану посівів змінюють прогнозований рівень врожаю сільськогосподарських культур.

Під час подальших досліджень доцільно оцінити вплив окремих біологічних та організаційно-техногенних чинників на рівень врожаю, а також застосування розробленого методу для конкретних сільськогосподарських культур.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Якушев, В.П. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства [Текст] / Якушев В.П., Дубенко Н.Н., Лупян Е.А // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: Институт космических исследований РАН. – 2019. – Вып. 16(3). – С. 11-23. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
2. Remote Sensing and Cropping Practices: A Review [Text] / A. Bégué, D. Arvor, B. Bellon, J. Betbeder, D. de Abelleira, R. P. D. Ferraz, V. Lebourgeois, C. Lelong, M. Simões, S. R. Verón // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 1-32. doi: 10.3390/rs10010103.
3. Марюшко, М.В. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2 [Текст] / Марюшко М.В., Пащенко Р.Е., Коблюк Н.С. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – №1(89). – С. 99 – 108. doi: 10.32620/reks.2019.1.11
4. Марюшко, М.В. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур [Текст] / Марюшко М.В., Пащенко Р.Е. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Харків: РЕКС, 2020. Вип. 4(96). С. 34-47. doi: 10.32620/reks.2020.4.03.
5. Слободяник, М.П. Прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за матеріалами ДЗЗ та вегетаційними індексами [Текст] / М.П. Слободяник // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 6 (93). – С. 16 – 20.
6. Черепанов, А.С. Вегетационные индексы [Текст] / А.С. Черепанов // ГЕОМАТИКА. – 2011. – № 2 (11). – С. 98–102.
7. Факторы, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур в условиях Новгородской области [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://apk.novreg.ru/factory-vliyayushchie-na-urozhaynost-sel-skokhozyaystvennykh-kul-tur-v-usloviyakh-novgorodskoy-oblasti.html> – 25.09.2021 p.
8. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Саати Т., Кернс К. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
9. Пащенко, Р.Е. Оцінка швидкості процесу фотосинтезу рослин при нечіткому описі факторів впливу та індикаторів [Текст] / Пащенко Р.Е., Марюшко М.В. // Сучасні інформаційні системи. – 2021. – том. 5, № 3. – С. 31 – 39. doi: 10.20998/2522-9052.2021.3.05.
10. Подхватилина, С.С. Зависимость урожайности сельскохозяйственных культур в республике Беларусь от влияния природных и антропогенных факторов [Текст] / Подхватилина С.С. // Бухгалтерский учет и анализ. – 2015. – №6. – С. 23 – 27.
11. Ягер, Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения [Текст] / Ягер Р.Р. – М.: Радио и связь, 1986. – 405 с.
12. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Саати Т. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

Received (Надійшла) 24.05.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.08.2022

Prognostication harvest level of agricultural cultures with the use unclear description of influence factors and plants state indicators

R. Pashchenko, M. Mariushko

Abstract. The **subject** of the study in the article is an estimation possibility of prognostication level of agricultural cultures harvest at unclear description influence factors and special plants state indicators. The **object** of the study is determination of harvest level in set moment of time if the known influence factors and the plants state indicators which turn out with the use of the controlled from distance facilities. The **goal** is consideration method and ground of decision-making, about the harvest level of agricultural cultures if unclear description of factors which influence on their, and plants state indicators. The **tasks**: analysis various monitoring methods of the agricultural cultures state and prognostication of their harvest; determination of influence factors on the harvest level and plants state indicators; consideration possibility of description of influence factors and indicators with the use of fuzzy sets theory; estimation possibility of the use the remote sensing information for the receipt numeral values of influence factors and plants state indicators; development of method prognostication of harvest level agricultural cultures with the use of unclear description influence factors of and plants state indicators; ground of decision-making about a harvest level of agricultural cultures at the set values of influence factors and plants state indicators. **The following results were obtained.** As a result of research unclear description of influence factors and plants state indicators was entered. It is showed that unclear description can be used for influences factors which are determined, both in number and high-quality. On the basis of such description the method of decision-making about a harvest level is developed taking into account the index NDVI and fractal dimension. The results of determination different degrees of harvest level of are resulted for four different sets of values of influence factors and plants state indicators. It is showed, as unclear values of factors and indicators in a different degree influence on the estimation of harvest level. **Conclusions.** The method of prognostication described in this work allows to analyses, as different sets of values of influence factors and plants state indicators change the forecast harvest level of agricultural cultures.

Keywords: Earth remote sensing data, prognostication of harvest level, unclear description of influence factors, index NDVI, fractal dimension.