

АЛГОРИТМ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Представлено огляд існуючих моделей розвитку зернових культур періоду від посіву до появи сходів та алгоритм розробленої динамічної моделі, котра описує фізіологічні та біохімічні процеси, що протікають в насінні в цей період. Детально описана структура та схема моделі.

Ключові слова: насіння, ендосперм, зародок, проросток, пагін, ріст, дихання, гідроліз, білок, вуглеводи, сходи, схожість.

Вступ. Першим критичним періодом для рослин є розвиток від посіву до сходів. Від того, при яких умовах проходить цей період залежить весь подальший вегетаційний розвиток та формування врожаю. Математичний опис та моделювання процесу проростання насіння дає можливість отримання даних про строки появи сходів, оцінки якості та повноти сходів та їх прогнозування. В існуючих моделях типу «погода – врожай» період від посіву до сходів представлено як блок (або субмодель). Тому від адекватності результатів роботи даного блоку залежить точність прогнозування всього подальшого вегетаційного періоду.

Метою дослідження є огляд існуючих моделей та субмоделей періоду від посіву до сходів зернових культур, визначення та опис структури розробленої моделі цього періоду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день відома велика кількість моделей розвитку різних культур. Проблемою прогнозування урожайності в тій чи іншій мірі займаються науковці всіх країн з розвинутим сільським господарством. Найбільші досягнення в цьому плані мають Сполучені Штати Америки та Європейська Комісія. В Україні також було проведено низку досліджень, на основі яких розроблено статистично-біологічні моделі прогнозування урожайності сільськогосподарських культур. Ряд вчених займалися моделюванням врожаїв саме зернових культур, зокрема, А.М. Польовий, П.В.Дмитренко, О.М. Дрозд, В.С. Антоненко та інші. Такі моделі імітують ріст та розвиток рослин під впливом широкого ряду факторів навколишнього середовища.

Більшість моделей ранніх етапів розвитку існують як складові блоки моделей «погода – врожай», але виділяються і деякі самостійні моделі. Моделюванням періоду розвитку від висіву до сходів займалися як вітчизняні, так і зарубіжні автори.

Моделі можуть враховувати широкий спектр факторів навколишнього середовища, що впливають на проростання, хоча існують і простіші моделі, які враховують вплив лише кількох факторів. Такі моделі є простішими у застосуванні, але часом поступаються у точності багатфакторним моделям. Однак не можна однозначно сказати, котрі з них краще застосовувати на практиці, адже всі вони мають ряд переваг та недоліків.

Як вхідну інформацію моделі зазвичай використовують параметри ґрунту (його вологість, температуру, водний потенціал тощо) та посівного матеріалу (масу та розмір, вологість, водний потенціал, проникність оболонки насіння тощо). Результатом розрахунків моделей є строки та повнота появи сходів.

Модель А.М. Польового, М.А.Строганової та А.І. Коровіна [8] складається з блоків, які описують послідовні та одночасні фізіолого-біохімічні процеси, такі як гідроліз запасів ендосперму, дихання, розподіл продуктів гідролізу між органами проростка та мобілізація їх для росту зародка, а потім проростка. Ці процеси

визначають швидкість росту проростка та повноту сходів. Оскільки гідроліз та дихання регулюються вологістю насіння, тому в моделі врахована також швидкість поглинання води $\left(\frac{dm}{dt}\right)$, що складається з фаз простої дифузії та осмосу і представлена рівнянням

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} c(m_s - m) & \text{при } m_0 \leq m < m_{crit}^1, \\ k_w A(\psi^{out} - \psi^{in}) & \text{при } m_{crit}^1 \leq m < m_{crit}^2, \end{cases} \quad (1)$$

де m_s – максимальна кількість води, що може бути поглинута шляхом дифузії; m – кількість поглинутої води в момент t ; m_0 – вологість насіння при посіві; m_{crit}^1 , m_{crit}^2 – критичні значення вологості, що визначають початок гідролізу та час проростання насіння; c – коефіцієнт швидкості набухання; k_w – коефіцієнт проникності; A – коефіцієнт, що характеризує розміри насіння; ψ^{out} , ψ^{in} – водні потенціали середовища набухання та насіння.

Простіші моделі ранніх етапів розвитку зернових розглядають динаміку процесів, що відбуваються в насінні, як перерозподіл мас між запасними та зростаючими органами. Тобто після набору необхідної кількості води насінням активізуються ростові процеси у проростку, з цього моменту запасні речовини ендосперму поступово витрачаються на ріст осьових органів. У такому випадку враховується лише фізика процесу проростання.

Згідно моделі В.М. Павлової [5], набухання зернівки можна описати таким рівнянням

$$\theta^{j+1} = \theta^j + \delta_w \xi(T) \eta(j) (\theta_s - \theta^j), \quad (2)$$

де θ – вологість зерна в j -ту та $(j+1)$ -у добу; θ_s – вологість зерна, при котрій насіння наклюнується; $\xi(T)$, $\eta(j)$ – функції, що враховують вплив навколишнього середовища; δ_w – одинична функція, яка дорівнює одиниці в діапазоні доступної води та нуль – поза цим діапазоном. Розрахунок ведеться доки $\theta^{j+1} \leq \theta_s$.

Динаміка маси зернівки, кореня та пагона представлена системою рівнянь

$$\begin{cases} m_S^{j+1} = m_S^j - (m_S^j R_0 \varphi_T + \Delta m_S^j), \\ m_h^{j+1} = m_h^j + \alpha_h(T, W) \Delta m_S^j, \\ m_r^{j+1} = m_S^j - m_h^{j+1}, \end{cases} \quad (3)$$

де m_p ($P \square S, h, r$) – маса органа в j -ту та $(j+1)$ -у добу; R_0 – коефіцієнт дихання підтримки; φ_T – температурний коефіцієнт дихання; $\alpha_h(T, W)$ – частка поживних речовин, направлена на ріст; Δm_S^j – зміна маси зерна за j -ту добу.

Складнішу модель проростання та формування сходів запропонував В.С. Антоненко [1]. В ній враховані водні потенціали насіння та ґрунту, гідроліз запасних речовин та дихання зернівки і проростка.

Швидкість гідролізу $\left(\frac{dm_{сем}^{зудр}}{dt}\right)$ в моделі описана рівнянням

$$\frac{dm_{сем}^{зудр}}{dt} = K_{сем}^{зудр} m_{сем} k_{cee}(T_n), \quad (4)$$

де $K_{сем}^{зудр}$ – коефіцієнт швидкості гідролізу; $m_{сем}$ – маса насіння; $k_{cee}(T_n)$ – функція впливу температури ґрунту на глибині закладки насіння на швидкість гідролізу запасних речовин.

Витрати на дихання насіння $\left(\frac{dR_{cem}}{dt}\right)$ представлені у вигляді рівняння

$$\frac{dR_{cem}}{dt} = c_m m_{cem} Q_R(T_n), \quad (5)$$

де c_m – коефіцієнт витратна дихання підтримки; $Q_R(T_n)$ – функція впливу температури ґрунту на інтенсивність дихання насіння. Частина поживних речовин, що залишилися після витрат на дихання є резервом для росту кореня та колеоптилю.

В моделі О.А. Немченко та Л.І. Мусаменко росту та метаболізму рослин на ранніх етапах онтогенезу [3] аналізувалися три основні складові процесу проростання: гідроліз запасних речовин і утворення фондів, транспорт фондових речовин проростку, синтез з них нової структурної фітомаси. Моделювалися перетворення і динаміка вуглеводів і азотовмісних речовин при постійних умовах зовнішнього середовища. Із структурних речовин у модель були включені складні вуглеводи і білки. У кожному компартменті виділено два фонди лабільних речовин - фонд вуглеводів, що складається з моно- і олігосахаридів, і фонд азоту, який складається з амінокислот. Підтримання життєздатності насіння і проростків, що включають білковий обмін, і підтримка іонного градієнта на мембранах вимагає витрат енергії, які враховуються в моделі у вигляді дихання підтримання. Витрати енергії, необхідні для створення нової структурної маси, характеризуються диханням росту.

Згідно Р.А. Полуектовим [6], динаміку росту основних біометричних показників моделі можна описати наступною системою диференційних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dB_l}{dt} = SHARE \cdot \frac{dB_{st}}{dt}, \\ \frac{dB_r}{dt} = (1 - SHARE) \cdot \frac{dB_{st}}{dt}, \\ L_l = BL_l \cdot B_l, \\ L_r = BL_r \cdot B_r, \end{cases} \quad (6)$$

де B_l, B_r – суха біомаса пагона та кореня, L_l, L_r – довжина листа та кореня, BL^* – коефіцієнт конверсії сухої структурної біомаси в довжину для обраного органа рослини. Алгоритм ростової регуляції, виражений за допомогою змінної SHARE, набуває значення від 0 до 1.

Вся модель поділена на послідовні підмоделі: поглинання води насінням, вуглеводно-азотного метаболізму, вуглеводно-азотної взаємодії в ендоспермі, вуглеводно-азотної взаємодії в проростку.

За останні кілька десятиліть було створено ряд математичних моделей росту культур, таких як CERES, WOFOST, SUCROS, APSIM, InfoCrop тощо, які також частково враховують ранні етапи розвитку [10, 13].

Зарубіжними авторами [12] було проведено ряд експериментів з пророщування насіння в закритому ґрунті, на основі яких було визначено загальну бета-функцію, що описує залежність рівня проростання від температури

$$GR = \exp(\mu)(T)\alpha(42 - T)\beta. \quad (7)$$

В моделі за найнижчу температуру, при якій припиняється будь-який ріст, представлений $T_b = 0$ °C; $T_c = 42$ °C – критичний рівень температури. На основі регресійного аналізу було визначено значення параметрів бета-функції: $\mu = -8.0166$, $\alpha = 1.80$ та $\beta = 0.72$.

Для бета-функції оптимальна температура (T_0) та оптимальне значення DDR (рівень щоденного розвитку) T_0 (DDR₀) можна визначити на основі зазначених п'яти параметрів моделі:

$$T_0 = \frac{\alpha T_c + \beta T_b}{\alpha + \beta}, \quad (8)$$

$$DDR_0 = \exp(\mu) \alpha^\alpha \beta^\beta \left(\frac{T_c - T_b}{\alpha + \beta} \right)^{\alpha + \beta}. \quad (9)$$

Визначено, що за оптимальної температури, близької 30⁰С, рівень проростання при T_0 становить близько 0.9 на день.

Автори [9] пропонують визначати швидкість проростання насіння за таким рівнянням

$$CGV = \frac{\sum N_j}{\sum N_j d_j}, \quad (10)$$

де N_j – кількість пророслих насінин за d_j днів після початкового поливу (посадки) та j – номер спостереження. CGV змінюється в межах від 0 до 1. Крім того визначався індекс температури проростання (ГПІ). Рівень проростання при нормальних умовах (GR_i^{REF}) прямо пропорційний кількості днів після посадки (DAP_i)

$$GR_i^{REF} = 1 / DAP_i \quad (11)$$

Рівень появи сходів (ER_i) можна розрахувати за такою формулою

$$ER_i = ER^{REF} \cdot ETI \cdot EWI, \quad (12)$$

де ER^{REF} – рівень появи сходів за нормальних умов, а ETI та EWI – функції впливу температури та осмотичного потенціалу на подовження осьових органів відповідно.

Автор [11] відокремлює стан спокою насіння. Модель основана на припущенні, що для початку розвитку необхідне накопичення «термічного часу». Для цього розраховується сума ефективних температур згідно рівняння, наведеного нижче,

$$TT_{ar} = (T_s - T_1) t_{ar}, \quad (13)$$

де TT_{ar} – термічний час розвитку, T_s – накопичення температур, T_1 – критичний рівень температури, при якому розвиток не відбувається, t_{ar} – час, котрий потрібен для досягання.

Крім того модель розраховує втрати після початку розвитку насіння через зміну водного потенціалу середи, що дозволяє отримати 50% пророслого насіння ($\psi_{b(50)}$) Модель припускає, що ($\psi_{b(50)}$) є лінійною функцією TT_{ar} . Зменшення $\psi_{b(50)}$ за весь період виражено рівнянням

$$\psi_{b(50)decrement} = \frac{\psi_{b(50)initial} - \psi_{b(50)final}}{TT_{ar}}. \quad (14)$$

Крім основних факторів ґрунту, що визначають проростання насіння, зазначених у моделях попередніх авторів тут включається якість повітря.

Далі висвітлено алгоритм динамічної моделі проростання насіння та формування сходів зернових культур. Розробка математичного методу розрахунку та оцінки умов формування сходів, їх повноти та часу утворення сприяє полегшенню агрометеорологічного забезпечення сільського господарства, дозволяє прогнозувати стан розвитку культури та своєчасно приймати рішення щодо ведення господарства. Представлена модель націлена на усунення недоліків та удосконалення попередніх моделей періоду від посіву до появи сходів. Модель дозволяє визначити реакцію процесів, що відбуваються в насінні, на зміни умов навколишнього середовища.

Результати дослідження та їх аналіз.

Алгоритм моделі створено на основі існуючих моделей формування сходів з

внесенням певних модифікацій.

На першому етапі моделі описується лише поглинання вологи насінням. З того моменту, коли рівень вологи зернівки досяг певного критичного значення (*crit 1*), починається також розрахунок швидкості гідролізу запасного білка, крохмалю та дихання зародка та ендосперму. Коли вологість насіння досягає наступного критичного значення (*crit 2*) починається ріст проростка (органа проростаючого насіння, котрий в свою чергу складається із зачатків корінця та пагона) і замість дихання зародка вже враховується дихання проростка. На цьому етапі припиняється розрахунок вологості насіння. Далі визначається швидкість розподілу азоту і вуглецю та накопичення сухої маси осьовими органами. Для того, щоб відмітити момент появи сходів, паралельно обчислюється довжина пагона. Розрахунок припиняється, коли його довжина дорівнює глибині закладення насіння. Крім того, визначається коефіцієнт польової схожості насіння, розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння та кількість рослин на одиницю площі. Схема моделі представлена на рис. 1.

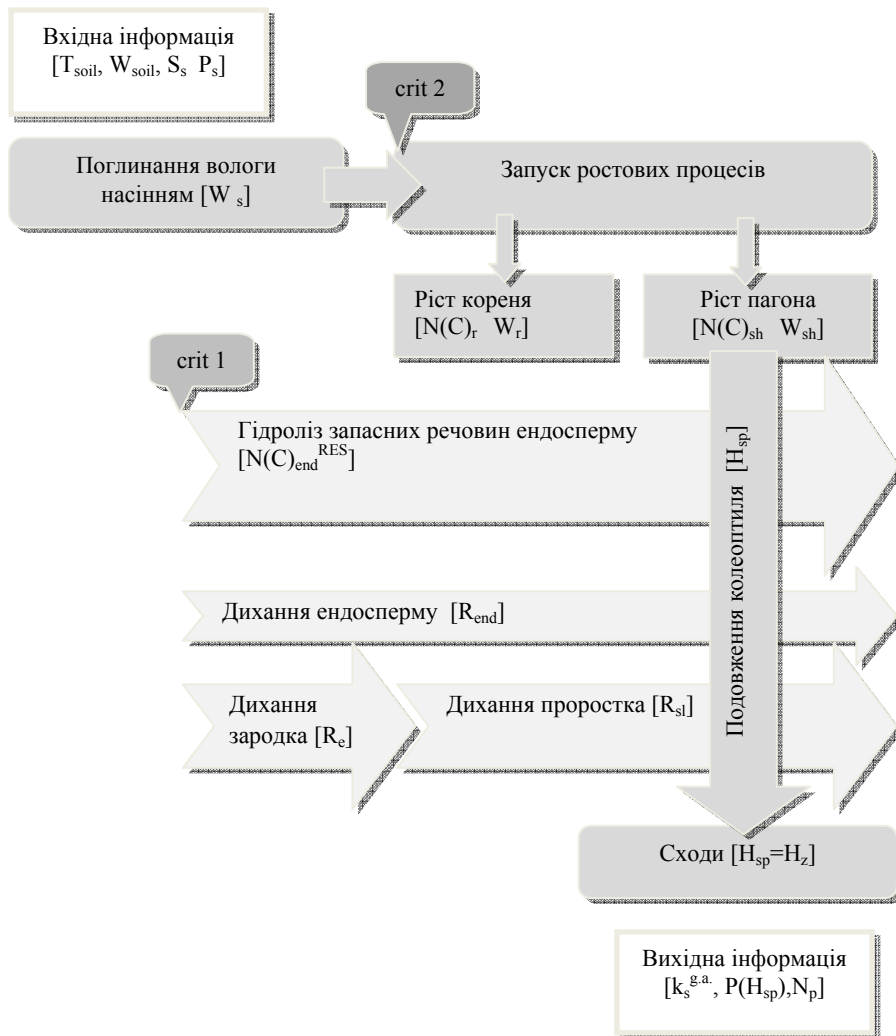


Рис.1 – Схема моделі формування сходів зернових культур.

Потрапивши у ґрунт, насіння починає інтенсивно поглинати вологу. Цей процес відбувається завдяки різниці водних потенціалів ґрунту та насіння. Рівняння, що описує процес накопичення вологи насінням, наведено нижче.

$$\frac{dW_s}{dt} = S_s P_s \left[\exp\left(-\frac{4186,8 E_s}{R_{const} T_{soil}}\right) (\psi_{soil} - \psi_s) \right], \quad (15)$$

де $\frac{dW_s}{dt}$ – потік води, що надходить в насіння; S_s – поглинальна поверхня насіння; P_s – проникність оболонки насіння; 4186,8 – коефіцієнт для перерахунку ккал в Дж; E_s – енергія активації дифузії; R_{const} – газова стала; T_{soil} – температура ґрунту на глибині закладки насіння; ψ_{soil} – водний потенціал ґрунту; ψ_s – водний потенціал насіння.

Водні потенціали ґрунту та насіння можна визначити за такими рівняннями:

$$\psi_{soil} = 1,5 \exp\left(-7,76 \frac{W_{soil} - B3}{PB - B3}\right), \quad (16)$$

$$\psi_s = \frac{R_{const} T_{soil}}{\bar{V}_m} \ln m, \quad (17)$$

де W_{soil} – вологість ґрунту; $B3$ та PB – вологість в'янення та повна вологоємність ґрунту відповідно; \bar{V}_m – порційний молярний об'єм; m – кількість поглинутої води. Емпірична формула (15) була запропонована О.Д. Сидоренко [7]

Основними частинами насіння є ендосперм та зародок. Відомо, що білки поглинають воду значно інтенсивніше, ніж вуглеводи. У складі зародка переважає запасний білок, саме тому зародок набухає швидше, збільшує свої розміри і створює певне загострення, що виступає під оболонкою зерна. Цей стан прийнято називати наклеюванням зерна [4].

Коли вологість насіння досягає певного першого критичного значення, починається гідроліз запасного білка та крохмалю

$$\frac{dN(C)_{end}^{RES}}{dt} = \begin{cases} -k_{N(C)}^1 & \text{при} \\ -k_{N(C)}^2 N(C)_{end}^{RES} & \text{при } N(C)_{crit}^{RES} < N(C)_{end}^{RES} \leq N(C)_0^{RES} \\ & \text{при } N(C)_{end}^{RES} \leq N(C)_{crit}^{RES}, \end{cases} \quad (18)$$

де $\frac{dN(C)_{end}^{RES}}{dt}$ – швидкість гідролізу запасного білка (або крохмалю) ендосперму;

$N(C)_{end}^{RES}$ – кількість білка (крохмалю), що залишилась в ендоспермі до моменту t ;

$N(C)_0^{RES}$ – початкова кількість запасного білка (крохмалю) в ендоспермі; $N(C)_{crit}^{RES}$ –

критична кількість запасного білка (крохмалю) в ендоспермі, що визначає початок реакції гідролізу; $k_{N(C)}^1$ – додатна величина, яка позначає постійну в часі швидкість

гідролізу білку (крохмалю) ендосперму; $k_{N(C)}^2$ – додатні коефіцієнти швидкості гідролізу.

У процесі гідролізу запасний крохмаль утворює фонди лабільних вуглеводів (C_{end}^F), запасний білок – фонди лабільних амінокислот (N_{end}^F) ендосперму. Тому швидкість утворення фондів дорівнює швидкості гідролізу запасних речовин ендосперму.

Речовини, котрі утворилися в результаті гідролізу, використовуються на дихання зародка та ендосперму. Слід відзначити, що зародок дихає значно інтенсивніше, ніж ендосперм (10% від інтенсивності дихання зародка). Коли вологість насіння досягла наступного критичного значення, відбувається запуск ростових

процесів у насінні. Починає розвиватися проросток, котрий складається з кореня та пагона (колеоптиля). З цього моменту дихання зародка не враховується, але починається визначення швидкості дихання проростка. Ці процеси описані рівняннями, наведеними нижче:

$$\frac{dR_e}{dt} = G_r^e \frac{dC_e^F}{dt} + R_m k_T W_e, \quad (19)$$

$$\frac{dR_{end}}{dt} = 0,1 \frac{dR_e}{dt}, \quad (20)$$

$$\frac{dR_{sl}}{dt} = G_r^{sl} \frac{dC_{sl}^F}{dt} + R_m k_T W_{sl}, \quad (21)$$

$$\frac{dC_{e(sl)}^F}{dt} = \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} - \frac{dR_{end}}{dt}, \quad (22)$$

де $\frac{dR_e}{dt} \left(\frac{dR_{sl}}{dt}, \frac{dR_{end}}{dt} \right)$ – швидкість дихання зародка (проростка, ендосперму) в мг С за добу; $G_r^e \left(G_r^{sl} \right)$ – швидкість дихання зародка (проростка) в мгС/мгС; R_m – швидкість дихання підтримки структур; $W_{e(sl)}$ – суха маса зародка (проростка); k_T – коефіцієнт, що враховує вплив температури на дихання підтримки структур; $\frac{dC_e^F}{dt} \left(\frac{dC_{sl}^F}{dt} \right)$ – швидкість

накопичення фондів вуглеводів зародка (проростка).

Для визначення швидкості розподілу азоту і вуглецю та накопичення сухої маси осьовими органами взяті системи рівнянь, аналогічні моделі А.М. Польового:

$$\frac{dN_i}{dt} = \alpha_i \frac{dN_{end}^{RES}}{dt}, \text{ при } \frac{dN_{e(sl)}^W}{dt} = \frac{dN_{end}^F}{dt}, \quad (23)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i k_m \frac{dN_i}{dt}, (i \in r, sp), \quad (24)$$

де $\left(\frac{dN_i}{dt}, \frac{dC_i}{dt} \right)$ – швидкості розподілу азоту і вуглецю між зростаючими органами; α_i, γ_i – коефіцієнти швидкості розподілу азоту та вуглецю в i -тий орган; k_m – коефіцієнт, що враховує вологість ґрунту; r, sp – корінь та пагін відповідно.

Наступним рівнянням описане накопичення сухої маси i -тим органом

$$\frac{dW_i}{dt} = k_c \frac{dC_i}{dt} + \frac{dN_i}{dt}, \quad (25)$$

де $\frac{dW_i}{dt}$ – швидкість накопичення сухої маси; k_c – коефіцієнт для перерахунку вуглецю в органічну речовину.

Пагін представляє собою циліндр постійного радіусу. Швидкість подовження колеоптиля описана як функція накопичення його маси із врахуванням механічного опору ґрунту, що визначається щільністю ґрунту ρ_{soil} та його вологістю

$$\frac{dH_{sp}}{dt} = \left(\frac{dm_{sp}}{dt} \frac{1}{\rho_{sp}} \right) \frac{3}{\pi r_{sp}^2} k_{sp} (\rho_{soil}) k_{sp} (W_{soil}), \quad (26)$$

де $\frac{dH_{sp}}{dt}$ – швидкість росту пагона в довжину; ρ_{col} – питома щільність рослинної маси пагона; r_{sp} – радіус основи пагона; $k_{sp}(\rho_{soil})$ – функція впливу щільності ґрунту на ріст пагона; $k_{sp}(W_{soil})$ – функція впливу вологості верхніх шарів ґрунту на подовження пагону.

Коли довжина пагона дорівнює глибині закладення насіння, пагін досягає поверхні землі – спостерігаються сходи. Пагін припиняє свій ріст, а крізь верхівку колеоптиля проривається перший лист.

Крім відмічення факту появи сходів, необхідно визначити польову схожість насіння. Рівняння, що дозволяє визначити цю характеристику, має вигляд [2]

$$k_s^{g.a..} = \frac{W_{0-20}}{a + bW_{0-20}}, \quad (27)$$

де $k_s^{g.a..}$ – коефіцієнт польової схожості насіння; W_{0-20} – вологість ґрунту в орному шарі; a і b – коефіцієнти, що визначаються глибиною закладення насіння:

$$a = 2,1 + 0,29(H_z)^2, \quad (28)$$

$$b = 1,03 - 0,0127(H_z)^2, \quad (29)$$

де H_z – глибина закладення насіння.

Глибина закладки насіння може змінюватися в залежності від мікрорельєфу ґрунту. Згідно моделі В.М. Павлової, на основі опосередкованих даних була обрана функція розподілу кількості рослин з різною глибиною закладення насіння

$$P(H_{sp}) = \frac{1}{1,5\sqrt{2\pi}} e^{-(H_{sp} - H_z^p)^2 / 2,25}, \quad (30)$$

де H_z^p – найімовірніша глибина закладення насіння.

Після визначення H_{sp} на кожному кроці визначається ймовірнісний інтеграл функції щільності нормального розподілення. Якщо значення інтеграла функції перевищує 0,6, то вважається, що настали масові сходи.

Кількість рослин на одиницю площі N_p означено як добуток норми висіву N_s на коефіцієнт польової схожості насіння

$$N_p = k_s^{g.a..} N_s. \quad (31)$$

Висновки. Розроблена динамічна модель формування сходів зернових культур, котра дозволяє визначити дату появи сходів, польову схожість, розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння та кількість рослин на одиницю площі. Модель описує динаміку поглинання води насінням та фізіолого-біохімічних процесів, таких, як гідроліз запасів ендосперму, дихання, розподіл продуктів гідролізу між осьовими органами та їх ріст.

Список літератури

1. Антоненко В.С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы. – К.: «АртЭк», 2002. – С.64.

2. Ковтун И. И., Гласа Н. И., Митрофанов Б.А. Оптимизация условий возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – 288 с.
3. Немченко О. А., Мусаменко Л. И. Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах органогенеза // Физиология и биохимия культурных растений. – 1982. – Т. 14, №5. С.439 – 445.
4. Носатовский А.И. Пшеница. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950. – 408 с.
5. Павлова В.Н. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай»//Труды ВНИИСХМ. – 1983. – Вып. 8. – С. 28 – 36.
6. Подуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. – 396 с.
7. Сидоренко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистемы. – Л.: Гидрометиздат, 1981. – 167 с.
8. Строганова М.А., Коровин А.И., Полевой А.Н. Динамическая модель расходования запасов эндосперма семян зерновых культур в процессе прорастания и в период до появления всходов//Сельскохозяйственная биология. – 1983. - №1. – С. 126 – 135.
9. An Index Model for Predicting Seed Germination and Emergence. *David M. Alm et al.* Weed Technology, Vol. 7, No. 3 (Jul. - Sep., 1993), pp. 560-569.
10. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *P.K. Aggarwal et al.* / Agricultural Systems 89 (2006), 1–25.
11. Modeling seedling emergence. *F. Forcella et al.* / Field Crops Research 67 (2000) 123-139.
12. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Y.W. Jame, H.W. Cutforth* / Agricultural and Forest Meteorology 124 (2004) 207–218.
13. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *T. Palosuo et al.* / Europ. J. Agronomy 35 (2011) 103– 114

Алгоритм динамической модели формирования всходов зерновых культур. Синицына В.В.

Представлен обзор существующих моделей развития зерновых культур периода от посева до появления всходов и алгоритм разработанной динамической модели, которая описывает физиологические и биохимические процессы, протекающие в семени в данный период. Подробно описана структура и схема модели.

Ключевые слова: семя, эндосперм, зародыш, проросток, росток, рост, дыхание, гидролиз, белок, углеводы, всходи, всхожесть.

Algorithm of grain crop shoots formation model. Sinitsyna V.

Review of existing grain crop grow models of period from sowing to germination and the algorithm of developed dynamic model that describes the physiological and biochemical processes occurring in seeds during the period are discussed. The structure and the scheme of the model were described in details.

Keywords: seed, endosperm, embryo, seedling, sprout, growth, respiration, hydrolysis, protein, carbohydrates, germination, germinating ability.