Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского
Серия «География». Том 26 (65), № 2. 2013 г. С. 81–89.

УДК 633:631.547.15

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Сініцина В. В.

Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна
E-mail: victoria.sinitsyna@gmail.com

Представлено алгоритм розробленої динамічної моделі, котра описує фізіологічні та біохімічні процеси, що протікають в насінні в період від посіву до появи сходів. Детально описана структура та схема моделі. Алгоритм реалізований на ПК. Проведено ряд чисельних експериментів. Представлена модель може використовуватись в якості вхідного блоку моделей «погода – врожай» та в якості самостійної моделі для якісної і кількісної оцінки та прогнозування сходів.
Ключові слова: насіння, ендосперм, зародок, проросток, пагін, ріст, дихання, гідроліз, білок, вуглеводи, сходи, схожість.

ВСТУП

Від того, при яких умовах відбувається формування сходів залежить весь подальший хід вегетаційного періоду і 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.

1. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою дослідження є визначення та опис структури розробленої моделі періоду від посіву до появи сходів зернових культур, а також представлення отриманих результатів чисельних експериментів з моделлю.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Алгоритм моделі створено на основі існуючих моделей формування сходів з внесенням певних модифікацій [1, 2, 3, 4].

На першому етапі моделі описується лише поглинання вологи насінням. З того моменту, коли рівень вологи зернівки досяг певного критичного значення (*crit 1*), починається 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.

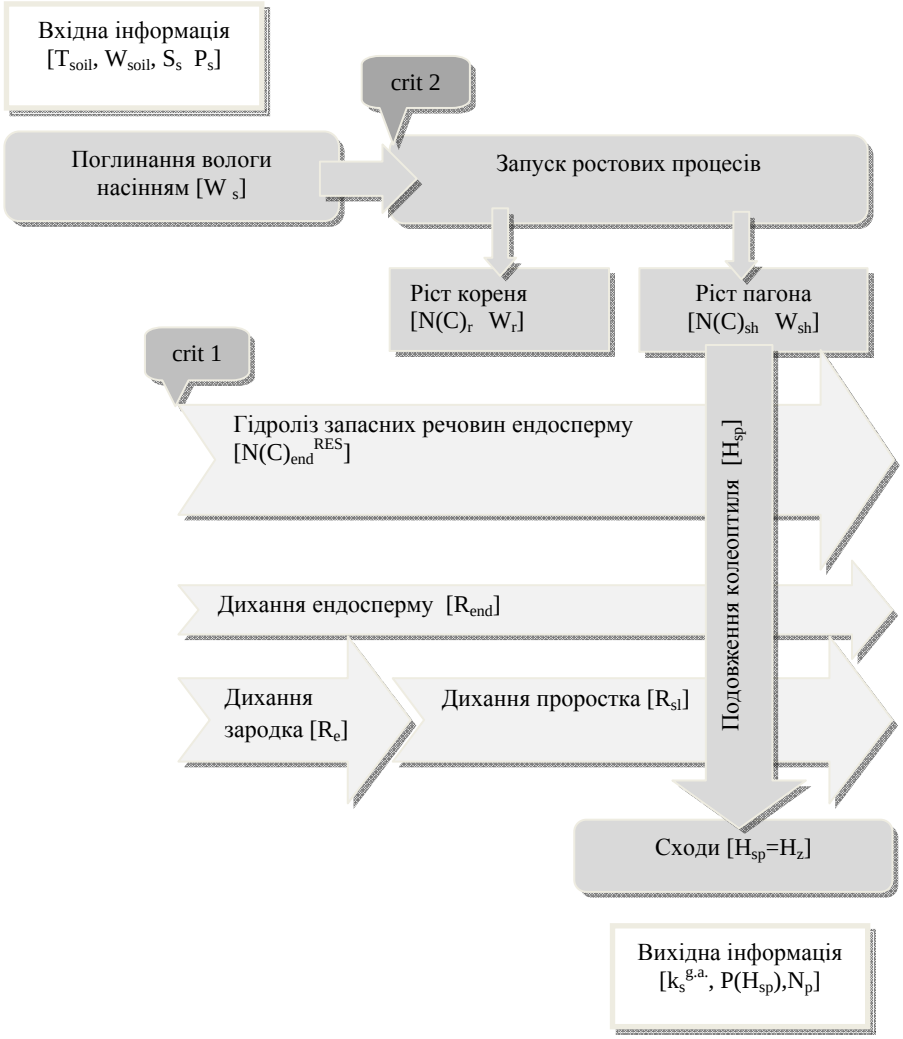

Рис.1. Схема моделі формування сходів зернових культур.

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, наведене нижче.

$$\frac{dW_s}{dt} = S_s P_s \left[exp\left(-\frac{4186{,}8 E_s}{R_{const} T_{soil}} \right) \right] \left(\psi_{soil} - \psi_s \right), \qquad (1)$$

де $\frac{dW_s}{dt}$ – потік вологи, 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:

$$\psi_{soil} = 1{,}5 exp\left(-7{,}76 \frac{W_{soil} - ВЗ}{ПВ - ВЗ} \right), \qquad (2)$$

$$\psi_s = \frac{R_{const} T_{soil}}{\overline{V_m}} ln\, m, \qquad (3)$$

де W_{soil} – вологість ґрунту; *ВЗ* та *ПВ* – вологість в'янення та повна вологоємність ґрунту відповідно; $\overline{V_m}$ – порційний молярний об'єм; *m* – кількість поглинутої води. Емпірична формула (2) була запропонована О.Д. Сидоренко [5]

Основними частинами насіння є ендосперм та зародок. Відомо, що білки поглинають воду значно інтенсивніше, аніж 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 накльовуванням зерна [6].

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

$$\frac{dN(C)_{end}^{RES}}{dt} = \begin{cases} -k_{N(C)}^{1} & \text{при } N(C)_{crit}^{RES} < N(C)_{end}^{RES} \le N(C)_0^{RES} \\ -k_{N(C)}^{2} N(C)_{end}^{RES} & \text{при } N(C)_{end}^{RES} \le N(C)_{crit}^{RES}, \end{cases} \qquad (4)$$

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 $\left(C_{end}^{F}\right)$, запасний білок – фонди лабільних амінокислот $\left(N_{end}^{F}\right)$ ендосперму. Тому швидкість утворення фондів дорівнює швидкості гідролізу запасних речовин ендосперму.

На практиці для моделювання швидкості гідролізу зручніше використовувати рівняння, котрі наведені далі.

$$\frac{d\left(N,C\right)_{end}^{RES}}{dt} = K_s^{гід} m_s k_s\left(T_{soil}\right), \tag{5}$$

де $\frac{d\left(N,C\right)_{end}^{RES}}{dt}$ – загальна швидкість гідролізу запасних речовин ендосперму, $K_s^{гід}$ – коефіцієнт швидкості гідролізу запасних речовин насіння, m_s – маса насіння, $k_s\left(T_{soil}\right)$ – функція впливу температури ґрунту на глибині закладення на швидкість гідролізу, котра визначається за наступною системою рівнянь

$$k_s\left(T_{soil}\right) = \begin{cases} 0{,}058 + 0{,}773x_1 + 1{,}913x_1^2 + 5{,}400x_1^3 - 3{,}322x_1^4 & при T < T_{opt_1} \\ 1 & при T_{opt_1} \le T \le T_{opt_2} \\ -11{,}47 + 29{,}87x_2^2 + 5{,}43x_2^3 & при T > T_{opt_2} \end{cases} \tag{6}$$

$$x_1 = \frac{T - T_{min}}{T_{opt_1} - T_{min}}, \tag{7}$$

$$x_2 = \frac{T - T_{opt_2}}{T_{max} - T_{opt_2}}, \tag{8}$$

де T – температура ґрунту, $T_{min(max)}$ – мінімальні та максимальні значення температури, при котрій починається та припиняється процес життєдіяльності, $T_{opt_1(opt_2)}$ – верхня та нижня межа оптимуму для протікання процесу.

Далі визначити вміст азоту та вуглецю окремо можна виходячи з припущення, що їх співвідношення у ендоспермі залишається постійним і може бути виражене за допомогою певного коефіцієнта α

$$\frac{dC_{end}^{RES}}{dt} = \alpha \frac{d\left(N,C\right)_{end}^{RES}}{dt}, \tag{9}$$

$$\frac{dN_{end}^{RES}}{dt} = \left(1-\alpha\right)\frac{d\left(N,C\right)_{end}^{RES}}{dt}. \tag{10}$$

Речовини, утворені в результаті гідролізу, затрачаються на дихання зародка та ендосперму. 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:

$$\frac{dR_e}{dt} = G_r^e \frac{dC_e^F}{dt} + R_m k_T W_e, \tag{11}$$

слід зазначити, що зародок дихає значно інтенсивніше, аніж ендосперм (10% від інтенсивності дихання зародка)[7]

$$\frac{dR_{end}}{dt} = 0{,}1\frac{dR_e}{dt}, \tag{12}$$

$$\frac{dR_{sl}}{dt} = G_r^{sl} \frac{dC_{sl}^F}{dt} + R_m k_T W_{sl}, \tag{13}$$

$$\frac{dC_{e(sl)}^F}{dt} = \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} - \frac{dR_{end}}{dt}, \tag{14}$$

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).

Але слід відмітити, що на практиці визначити інтенсивність дихання ендосперму зручніше за формулою, запропонованою Антоненко В.С., а швидкість дихання зародку – в перерахунку на інтенсивність дихання ендосперму

$$\frac{dR_{end}}{dt} = R_m m_s Q_R\left(T_{soil}\right), \tag{15}$$

де $Q_R\left(T_{soil}\right)$ – функція впливу температури ґрунту на інтенсивність дихання насіння, котру можна описати наступним рівнянням:

$$Q_R\left(T_{soil}\right) = 2^{0{,}1\left(T - T_{opt}\right)}. \tag{16}$$

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

$$\frac{dN_i}{dt} = \alpha_i \frac{dN_{end}^{RES}}{dt}, \text{ при } \frac{dN_{e(sl)}^W}{dt} = \frac{dN_{end}^F}{dt}, \tag{17}$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i k_m \frac{dN_i}{dt}, \left(i \in r, sp\right), \tag{18}$$

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

$$\frac{dW_i}{dt} = k_c \frac{dC_i}{dt} + \frac{dN_i}{dt}, \tag{19}$$

де $\frac{dW_i}{dt}$ – швидкість накопичення сухої маси; κ_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

$$\frac{dH_{sp}}{dt} = \left(\frac{dm_{sp}}{dt}\frac{1}{\rho_{sp}}\right)\frac{3}{\pi r_{sp}^2} k_{sp}(\rho_{soil}) k_{sp}(W_{soil}), \tag{20}$$

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.

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]

$$k_s^{g.a..} = \frac{W_{0-20}}{a + bW_{0-20}}, \tag{21}$$

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

$$a=2,1 + 0,29(H_z)^2, \tag{22}$$

$$b=1,03-0,0127(H_z)^2, \tag{23}$$

де H_z – глибина закладення насіння.

Глибина закладки насіння може змінюватися в залежності від мікрорельєфу ґрунту. Згідно моделі В.М. Павлової [8], на основі опосередкованих даних була обрана функція розподілу кількості рослин з різною глибиною закладення насіння

$$P(H_{sp}) = \frac{1}{1{,}5\sqrt{2\pi}} e^{-(H_{sp} - H_z^p)^2 / 2{,}25}, \qquad (24)$$

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

$$N_p = k_s^{g.a..} N_s. \qquad (25)$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Описана модель була реалізована на ПК за допомогою програми Microsoft Office Excel. З метою ідентифікації параметрів моделі була обрана кукурудза. Частина параметрів була отримана в результаті проведення експерименту з пророщування насіння кукурудзи у лабораторних умовах. Однак більшість параметрів були отримані шляхом проведення аналізу наявних у літературі даних, а також за допомогою оптимізації та ручної підбірки.

Проведено ряд чисельних експериментів з дослідження чутливості моделі до зміни параметрів навколишнього середовища під час накопичення вологи насінням. У якості кроку в часі обрано одну добу. Розглядався шар суглинкового ґрунту товщиною 5 см з найменшою вологоємкість 10 мм. Оптимальна вологість ґрунту складає 8 мм.

На рисунку 2 зображені результати чисельного експерименту з дослідження чутливості моделі до зміни температурних умов ґрунтового середовища. Експеримент було поставлено за умови оптимального зволоження, у інтервалі температури від 12 до 24 ^{o}C з кроком у 3 ^{o}C.

У моделі враховано, що на початку накопичення вологи насінням цей процес відбувається інтенсивніше аніж у наступний момент часу, а досягнувши критичного рівня (у даному випадку 44% вологості насіння) залишається незмінним. Крім того, з підвищенням температури ґрунту у насінні швидше відбувається запуск ростових процесів.

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 вологи насінням та фізіолого-біохімічних процесів, таких, як гідроліз запасів ендосперму, дихання, розподіл продуктів гідролізу між осьовими органами та їх ріст.

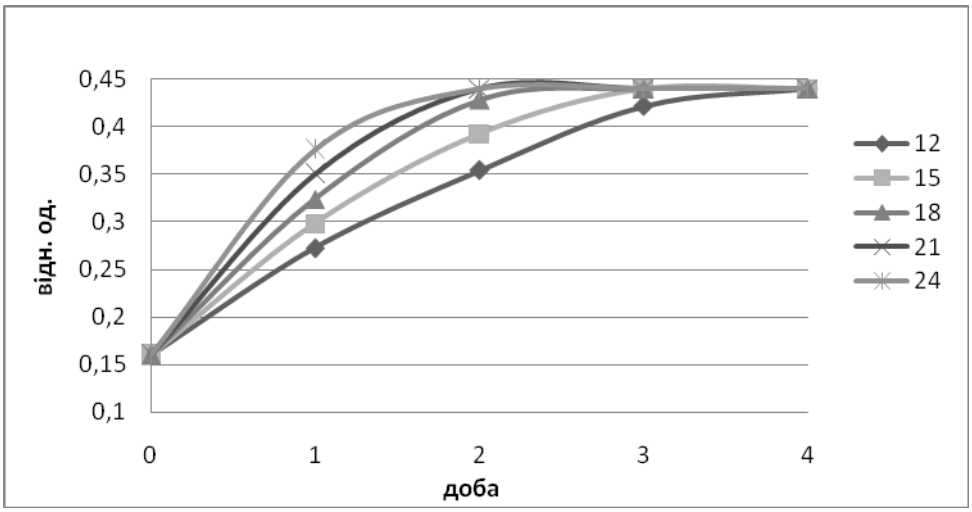

Рис. 2. Інтенсивність накопичення вологи насінням за умов оптимального зволоження та різній температурі ґрунту (^{o}C)

Список літератури

1. 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.
2. Антоненко В.С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы. – К.: «АртЭк», 2002. – С.64.
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. Modeling seedling emergence. F. Forcella et al. / Field Crops Research 67 (2000) 123-139.
5. Сидоренко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистемы. – Л.: Гидрометиздат, 1981. – 167 с.
6. Носатовский А.И. Пшеница. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950. – 408 с.
7. Польовий А.Н. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур // Український гідрометеорологічний журнал. – 2008. – №3. – С. 75 – 84.
8. Павлова В.Н. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай»//Труды ВНИИСХМ. – 1983. – Вып. 8. – С. 28 – 36.

Синицына В. В. Динамическая модель формирования всходов зерновых культур / В. В. Синицына // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: географические науки. – 2013 – Т. 26 (65), № 2. – С. 81–89.

Представлен алгоритм разработанной динамической модели, которая описывает физиологические и биохимические процессы, протекающие в семенах в период от посева до появления всходов. Подробно описана структура и схема модели. Алгоритм реализован на ПК. Проведен ряд численных экспериментов. Представленная модель может использоваться в качестве входного блока моделей «погода – урожай» и в качестве самостоятельной модели для качественной и количественной оценки и прогнозирования всходов.

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

Sinitsyna V. V. Dynamical model of crop seedling emergence / V. V. Sinitsyna // Scientific Notes of Taurida National V.I.Vernadsky University. – Series: Geographical Sciences. – 2013 – V. 26 (65), No 2. – P. 81–89.

Considered the algorithm of developed dynamic model which describes physiological and biochemical processes occurring in seeds during period from sowing to seedling emergence. The structure and the scheme of the model are described in details. The algorithm is implemented on a PC. Performed series of numerical experiments. The model can be used as an input block "weather – crop" model and as an independent model for qualitative and quantitative assessment and prediction of emergence.

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

Поступила в редакцию 03.04.2013 г.