

УДК 633.1:581.142

А.М. Польовий, д.г.н., проф.

Одеський державний екологічний університет

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Розроблено динамічну модель, яка описує фізіологічні й біохімічні процеси, що протікають в рослині в період від посіву до появи сходів. Структура моделі представлена системою диференціальних рівнянь.

Ключові слова: насіння, ендосперм, зародок, ріст, дихання, гідроліз, білок, крохмаль, вуглеводи, суха маса, сходи.

Процес проростання представляє собою сукупність процесів, які викликають перехід насіння із стану вимушеного покою в стан активного росту. Необхідною передумовою початку росту, здатного до проростання насіння, є поглинання вологи. Метаболічна активність насіння починається при набубнявінні і збільшується при наступному проростанні, яке регулюється усім комплексом факторів навколишнього середовища.

У проблемі кількісного опису впливу навколишнього середовища на процес проростання, ріст паростка і формування сходів виділяються два основних аспекти.

В зв'язку з тим, що початок появи метаболічної активності пов'язано з надходженням вологи в насіння, цілком природно, що при поясненні процесу проростання основна увага приділяється механізму поглинання вологи насінням [9]. На цій основі розглядається критичний рівень вмісту вологи в насінні, за якої воно може проростати, і всі процеси, що при цьому протікають. У моделі продуктивності бавовни описується поглинання вологи насінням, поява кореня і подовження гіпокотила [11]. В роботі [7] процес проростання при моделюванні ростових процесів у період проростання насіння представлено у вигляді двох взаємозалежних процесів: поглинання води зернівкою і росту зародкового корінця і паростка. Розглядаються витрати на дихання підтримки, динаміка біомаси зернівки, кореня, біомаси і довжини паростка.

У моделі витрат запасів ендосперму насіння зернових культур у процесі проростання [10] ріст паростка до сходів розглядається як результат протікання таких фізіологічних і біохімічних процесів, як поглинання води насінням, дихання насіння та паростка, гідроліз запасного білка й крохмалю ендосперму, розподіл продуктів гідролізу між органами паростка і мобілізація їх для росту зародка та паростка.

При моделюванні процесів росту розглядаються окремо екологічна частина, що включає вплив факторів навколишнього середовища на ріст, і власне біологічна, яка має інформацію про внутрішню організацію функціонування рослинного організму. У моделі росту і метаболізму рослин на ранніх етапах органогенезу [4] описуються три основні складові процесу проростання: гідроліз запасних речовин та утворення фондів, транспорт фондів речовин до паростка і синтез з них нової структурної фітомаси при постійних умовах навколишнього середовища.

Субмоделі (або блоки динамічних моделей), що описують нагромадження сухої маси паростками в період посів – сходи, як результат протікання фізіолого-біохімічних процесів у насінні й паростку за різних умов навколишнього середовища, не розроблялися. Необхідність подібних розробок обґрунтовується наступними причинами:

– фаза проростання насіння і появи сходів – важливий етап у формуванні урожаю сільськогосподарських культур, тому субмодель росту рослин в цей період надає динамічній моделі продукційного процесу рослин цілком закінчений етап;

– модель росту в період посів – сходи може бути цілком самостійною динамічною моделлю, яка дозволяє оцінити в залежності від умов навколишнього середовища термін появи сходів і повноту використання запасів ендосперму насіння в цей період.

Мета нашого дослідження полягає в моделюванні впливу факторів навколишнього середовища на витрати запасів ендосперму насіння в період від посіву до сходів та формування сходів зернових культур. Розробка такої моделі дозволяє оцінити стан посіву в період сходів, а якщо розглядати її як субмодель динамічної моделі формування урожаю – визначити ряд параметрів (суха маса паростка, вміст азоту і вуглеводів у паростку, час появи сходів та ін.) які можуть служити вхідними в субмодель росту рослин у період від сходів до виходу в трубку.

Процес витрати запасів ендосперму насіння зернових культур у період від посіву до появи сходів складається із взаємозалежних між собою фізіологічних і біохімічних процесів, таких, як гідроліз запасів ендосперму, дихання, розподіл продуктів гідролізу між органами паростка і мобілізація їх для росту зародка, а потім паростка. Ці процеси визначають швидкість росту паростків і повноту сходів. Початок процесів гідролізу й дихання регулюється вологістю насіння, тому в моделі враховано також поглинання води насінням.

Концепція, яка використана при моделюванні поглинання води, ґрунтується на припущенні про існування двох фаз у набування насіння [1]. Перша фаза – гідратація колоїдів, при якій основну роль відіграє проста дифузія. Друга фаза – осмос, обумовлений дією градієнта осмотичного потенціалу дифундуючої речовини – у даному випадку води.

У математичних моделях, які описують поглинання води насінням при набування, процес поглинання розглядається як проста дифузія. Першу фазу поглинання води ми відносимо до простої дифузії, а другу, осмотичну фазу представляємо таким рівнянням

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

де $\frac{dm}{dt}$ – швидкість поглинання води, г/г сухої маси насіння / год.; m_s – максимальна

кількість води, яка може бути поглинена шляхом дифузії, г/г сухої маси насіння;

m – кількість води, поглинена в момент t , г/г сухої маси насіння; m_0 – вологість насіння при посіві, г-води/г-сухої маси насіння; m_{crit}^1, m_{crit}^2 – критичні значення вологості, які

відповідно визначають початок гідролізу і час проростання насіння, г води/г сухої маси насіння; c – коефіцієнт швидкості набування, год⁻¹; k_w – коефіцієнт проникності, см/сек; A – коефіцієнт, який характеризує розмір насіння, см²/(0,1 Дж/см³);

ψ^{out} – водний потенціал середовища набування, Дж/см³; ψ^{in} – водний потенціал насіння, Дж/см³.

Вплив зовнішніх умов (температура ґрунту T_n і вологість ґрунту W_n) враховується при оцінці c , ψ^{out} , ψ^{in} .

Коефіцієнт швидкості набування оцінюється за співвідношенням

$$c = k_D \cdot D, \quad (2)$$

де k_D – коефіцієнт, який відображає вплив розмірів насіння, м⁻²·10⁻⁴;

D – дифузійність, $\text{м}^2 \cdot 10^{-4} / \text{год}$.

Дифузійність як функція температури описується рівнянням Арреніуса

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3)$$

де D_0 – дифузійність при нескінченно високій температурі, $\text{м}^2 \cdot 10^{-4} / \text{год}$;

E – енергія активації дифузії, Дж/моль; R – газова постійна, Дж/моль/град;

T – абсолютна температура, °К.

Хімічний склад насіння, який визначає опір гідравлічному потоку всередині насіння, відіграє істотну роль у поглинанні води. У різному насінні міститься різна кількість речовин, які розчиняються (сахари, органічні кислоти, амінокислоти та ін.), бубнявляють (білки, крохмаль, клітковина та ін.) і не бубнявляють у воді (жири, каротиноїди та ін.). Наприклад, у насінні пшениці речовини, які здатні до бубнявіння у воді, складають 80–85 %, у жита — 72–75 %.

Крохмаль, який набубнявіє, може поглинати до 35 % води, білки – до 250 % і слиз – до 800 %. Тому насіння, ендосперм або сім'ядолі якого складаються головним чином із крохмалю, поглинає води значно менше, ніж насіння, у якого переважають білки.

Розмір насіння також впливає на надходження води: дрібне насіння поглинає більше води (в % від маси), ніж велике. Так, насіння кукурудзи масою 251–270 мг поглинає через 36 год. 47 % води, а масою 331–350 мг – 40 % [6].

Водний потенціал середовища бубнявіння визначається як функція вологості ґрунту. В основу рівняння для оцінки водного потенціалу насіння використано рівняння

$$\psi^{in} = \frac{RT \ln\left(\frac{m}{m+M \cdot n_s}\right)}{M}, \quad (4)$$

де R – газова постійна, Дж/моль/град; n_s – кількість осмотично активних компонентів, моль; M – парціальний мольний об'єм води, $\text{см}^3 / \text{моль}$.

Пускові процеси гідролізу запасних речовин насіння і проростання насіння відбуваються в період досягнення насінням відповідно двох критичних рівнів оводненості.

При досягненні першого критичного рівня оводненості насіння m_{crit}^1 відбувається «запуск» процесів гідролізу запасних речовин насіння та синтезу вуглеводів і білків у зародку.

Надходження води в насіння – необхідна умова для початку процесів метаболізму в насінні, яке перебуває в стані спокою. Але для «запуску» як ферментів, що гідролізують запасні речовини, так і ферментів, що синтезують нові необхідні сполуки, потрібна така температура на глибині загорання насіння T_{crit} , за якої ці ферменти могли б проявити свою активність. Цим і пояснюється та обставина, що проростання різного насіння відбувається при різних температурах. «Запуск» процесів гідролізу та синтезу й проростання насіння відбуваються при температурі вище нуля. Однак мінімальна температура для початку цих процесів коливається у великих межах. Насіння жита, пшениці, ячменю, вівса, вики, сочевиці, гороху, чини, ріпи, моркви, брукви, ріжю, коноплі, гірчиці проростають при 1–2 °С; насіння кукурудзи, проса, сої – при 8–10 °С; квасолі, рицини, сорго – при 10–12 °С, а насіння бавовнику, рису, огірків, гарбуза, кавуна – при 12–14 °С [2].

Таким чином, на етапі досягнення першого критичного рівня оводненості насіння m_{crit}^1 і критичної температури ґрунту на глибині загортання насіння T_{crit} нами розглядається регульований факторами середовища гідроліз вуглеводів і білків насіння, в процесі якого утворюється фонд вільних вуглеводів та фонд азоту, який витрачається на дихання й ріст зародка.

У процесі гідролізу запасів ендосперму утворюються фонди лабільних вуглеводів C_{end}^F і амінокислот N_{end}^F ендосперму. Швидкість утворення вуглеводного фонду дорівнює швидкості гідролізу запасного крохмалю, а фонду амінокислот – швидкості гідролізу запасного білка.

При описі процесів гідролізу запасів крохмалю і білка взято за основу рівняння кінетики ферментативного каталізу. При високій концентрації гідролізуемого субстрату реакція гідролізу має псевдонульовий порядок з субстрату, а при низькій концентрації вона наближається до реакції псевдопершого порядку:

$$\frac{dN_{end}^{RES}}{dt} = \begin{cases} -k_N^1, & \text{при } N_{crit}^{RES} < N_{end}^{RES} \leq N_0^{RES} \\ -k_N^2 N_{end}^{RES}, & \text{при } N_{end}^{RES} \leq N_{crit}^{RES} \end{cases}; \quad (5)$$

$$\frac{dC_{end}^{RES}}{dt} = \begin{cases} -k_C^1, & \text{при } C_{crit}^{RES} < C_{end}^{RES} \leq C_0^{RES} \\ -k_C^2 \cdot C_{end}^{RES}, & \text{при } C_{end}^{RES} \leq C_{crit}^{RES} \end{cases}, \quad (6)$$

де $\frac{dN_{end}^{RES}}{dt}$ – швидкість гідролізу запасного білка ендосперму, мг·N/г сухої маси/доба;

$\frac{dC_{end}^{RES}}{dt}$ – швидкість гідролізу запасного крохмалю ендосперму, мг/г сухої маси/доба;

$N_{end}^{RES} (C_{end}^{RES})$ – кількість білка (або крохмалю), що залишилася в ендоспермі до моменту t , мгN(C)/г сухої маси;

$N_0^{RES} (C_0^{RES})$ – початкові кількості запасного білка (крохмалю) в ендоспермі, мгN(C)/г сухої маси;

$N_{crit}^{RES} (C_{crit}^{RES})$ – критичні кількості запасного білка (крохмалю) в ендоспермі, які визначають початок реакції гідролізу, як реакції псевдопершого порядку, мгN(C)/г сухої маси;

$k_N^1 (k_C^1)$ – позитивні величини, що означають постійну в часі швидкість гідролізу білка (крохмалю) ендосперму, мгN(C)/г сухої маси/доба;

$k_N^2 (k_C^2)$ – коефіцієнти швидкості гідролізу, доба⁻¹.

Рівняння (5) і (6) дійсні при вологості насіння 30 %.

Величини $k_N^1 (k_C^1)$ і $k_N^2 (k_C^2)$ є функціями температури $f(T)$ і вологості ґрунту $f(W)$. Частина фондів вуглеводів, які утворюються при гідролізі, використовується на дихання ендосперму, інша частина складає фонди субстратів для росту зародка і паростка $C_{e(sl)}^F$, що витрачаються на дихання і нагромадження сухої маси $C_{e(sl)}^W$.

Фонди амінокислот ендосперму цілком витрачаються на збільшення сухої маси зародка і паростка $N_{end}^F = N_{e(sl)}^W$.

Продукти гідролізу, що витрачаються на дихання насінини, підрозділяються в цей період на дихання зародка і дихання ендосперму, а також йдуть на синтез білків і вуглеводів у зростаючому зародку. В період від початку гідролізу, обумовленого досягненням першого критичного рівня оводненості насіння m_{crit}^1 , до проростання, обумовленого досягненням другого критичного рівня оводненості насіння m_{crit}^2 , ми розглядаємо зародок як однорідну меристематичну тканину, не виділяючи при цьому його окремі осьові органи.

Дихання цілої насінини складається з дихання запасуючих частин і зростаючих осьових органів. Основний внесок у дихання насінини вносять запасні речовини, оскільки їхня маса набагато більше, незважаючи на те, що в перерахуванні на одиницю сирової маси в них дихання слабкіше, ніж в осьових органах. Установлена [5] триступінчаста залежність дихання від оводненості тканин насіння. Дихання проростаючого насіння не регулюється часом, який пройшов від початку набубнявіння насіння, але залежить від вологості насіння.

На першому етапі поступове посилення дихання обумовлене рівнем вологості, досягнутим насінням, а не утрудненим доступом кисню або недостатчею дихальних субстратів. На другому етапі дихання різко посилюється, воно регулюється рівнем дихального субстрату і не залежить від подальшого підвищення оводненості. Третій етап відображає інтенсивність дихання зростаючих осьових органів, яким притаманні більш високі рівні вологості, оскільки клітини їх вакуолізуються і розтягуються.

Дихання зародка і паростка моделюється як дихання росту і дихання підтримки структур. До початку гідролізу в насінині дихає тільки зародок, в період від початку гідролізу до проростання – зародок і ендосперм, після проростання – ендосперм. Дихання ендосперму уповільнене через низьку активність синтетичних процесів у ньому, воно складає 10 % дихання зародка [3]. Процес дихання описується такими рівняннями:

$$\frac{dR_e}{dt} = G_r^e \frac{dC_e^F}{dt} + R_m k_T W_e, \quad \text{нпу} \quad m \geq m_1; \quad (7)$$

$$\frac{dR_{end}}{dt} = 0,1 \frac{dR_e}{dt}, \quad \text{нпу} \quad m \geq m_2; \quad (8)$$

$$\frac{dR_{sl}}{dt} = G_r^{sl} \frac{dC_{sl}^F}{dt} + R_m k_T W_{sl}, \quad \text{нпу} \quad m \geq m_3; \quad (9)$$

$$\frac{dC_{e(sl)}^F}{dt} = \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} - \frac{dN_{end}}{dt}, \quad (10)$$

де $\frac{dR_e}{dt} \left(\frac{dR_{sl}}{dt}, \frac{dR_{end}}{dt} \right)$ – швидкість дихання зародка (паростка, ендосперму),

мгС/доба; $G_r^e (G_r^{sl})$ – швидкість дихання зародка (паростка), мгС/мгС;

R_m – швидкість дихання підтримки структур, мгС/г сухої маси/доба;

$W_{e(sl)}$ – суха маса зародка (паростка), мг; k_T – коефіцієнт, що враховує вплив температури на дихання підтримки структур;

$\frac{dC_e^F}{dt} \left(\frac{dC_{sl}^F}{dt} \right)$ – швидкість нагромадження фондів вуглеводів зародка (паростка),

мгС/доба; m_1 – вологість насіння, за якої активізується дихання зародка, %; m_2 – вологість насіння на початку гідролізу, %; m_3 – вологість насіння при проростанні, %.

Швидкість зміни вільних вуглеводів і азоту в зародку визначається співвідношенням швидкостей притоку вільних вуглеводів і азоту ендосперму, витрат на синтез нових структур і дихання, пов'язаний як із процесами синтезу, так і підтримкою. При гідролізі білків поповнюються фонд азоту і фонд вуглеводів.

Сукупність фізичних і біохімічних змін, що відбуваються в насінині в процесі їхнього переходу зі стану спокою до активної життєдіяльності, при досягненні другого критичного рівня оводненості насіння m_{crit}^2 закінчується утворенням паростка. Вологість цілої насінини практично визначається вологістю, досягнутою ендоспермом, оскільки осьові органи зародка досить малі в порівнянні з запасуючими частинами насінини. Потреба насіння у волозі для початку їхнього проростання неоднакова для різних видів насіння. Насінню злаків для початку проростання необхідна більш низька оводненість; багате білком насіння бобових поглинає більше води, ніж крохмалисте насіння злаків. Дуже багато води поглинає при набубнявінні насіння льону і цукрового буряка, оболонки яких містять слизуваті гідрофільні полісахариди [2]. Критичний рівень оводненості насіння, коли починається проростання, варіює в широких межах.

З моменту досягнення другого критичного рівня оводненості насіння m_{crit}^2 зародок насінини стає паростком, який складається з колеоптиля і зародкових коренів. Всередині колеоптиля укладені зародкові фітомери. Кількість зародкових фітомерів є стійкою ознакою екотипу. Кількість зародкових коренів залежить від сорту і розміру насіння.

Моделюючи розподіл фондів вуглецю й азоту між органами зародка й паростка, приймаємо, що зародок і паросток складаються з двох компартментів: паростка (колеоптиля з укладеними усередині нього листками) і кореня. Зародок розглядається як однорідна меристематична тканина. Колеоптиль паростка в період від проростання до сходів проходить фазу ділення і розтягнення клітин, причому до моменту сходів колеоптиль вважаємо листком, який закінчив ріст. У корені знаходяться клітини, які діляться і розтягуються. Розподіл вуглеводів і азоту здійснюється по співвідношенню C/N , яке в процесі росту міняється (у меристематичних клітинах воно мінімальне, при розтягненні зростає). Допускаємо, що продукти гідролізу білка переміщуються в зародок (паросток) повністю і на даній фазі розвитку конкуренція за азот між органами відсутня [8], можна представити розподіл азоту і вуглецю наступною системою рівнянь:

$$\frac{dN_i}{dt} = \alpha_i \frac{dN_{end}^{RES}}{dt}, \quad npu \quad \frac{dN_{e(sl)}^W}{dt} = \frac{dN_{end}^F}{dt}; \quad (11)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i k_m \frac{dN_i}{dt}, \quad (12)$$

$i \in r, sh$

де $\frac{dN_i}{dt} \left(\frac{dC_i}{dt} \right)$ – швидкість розподілу азоту (вуглецю) у i -й орган, мгN(C)/орган/доба;

α_i – постійний коефіцієнт швидкості розподілу азоту в i -й орган;

γ_i – коефіцієнт швидкості розподілу вуглецю в i -й орган;

k_m – коефіцієнт, що враховує вплив вологості ґрунту.

Рівняння (12) дійсно за умови

$$\frac{dC_r}{dt} + \frac{dC_{sh}}{dt} = \left(\frac{dC_{end}^{RES}}{dt} - \frac{dR_{e(sl)}}{dt} \right) + \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} k_{PR}, \quad (13)$$

$$i \in r, sh,$$

де k_{PR} – коефіцієнт для розрахунку кількості вуглецю у гідролізованому білку.

Дотримання цієї умови означає, що процеси гідролізу запасів і їх мобілізація для росту цілком збалансовані.

Нагромадження сухої маси i -м органом описується рівнянням

$$\frac{dW_i}{dt} = k_c \frac{dC_i}{dt} + \frac{dN_i}{dt}, \quad (14)$$

де $\frac{dW_i}{dt}$ – швидкість накопичення сухої маси, мг/орган/доба;

k_c – коефіцієнт для перерахування вуглецю на органічну речовину.

Швидкість подовження паростка визначається як функція швидкості нагромадження сухої маси паростком з урахуванням опору ґрунту. Механічний опір ґрунту впливає на швидкість лінійного росту паростків в період до сходів.

Рівняння для опису швидкості подовження паростка має вигляд

$$\frac{dH_{sh}}{dt} = \frac{dW_{sh}/dt}{k_V} \cdot \frac{k_H}{\pi \cdot r_{sh}^2}, \quad (15)$$

де $\frac{dH_{sh}}{dt}$ – швидкість подовження паростка, см/доба;

$\frac{dW_{sh}}{dt}$ – швидкість нагромадження сухої маси паростками, г/доба;

k_V – коефіцієнт для перерахування на одиницю об'єму, г/см³; r_{sh} – радіус паростків, см;
 k_H – коефіцієнт для врахування опору ґрунту.

Описані в моделі процеси і зв'язки між ними представлені за допомогою символіки Форрестера на рис. 1. Суцільні лінії на діаграмі означають потоки речовини, пунктирні – потоки інформації, прямокутники – рівні (кількість) речовини, вентиля в каналах потоків – рівняння темпів потоків (тут же наводиться номер рівняння, яке описує швидкість потоку), кола – внутрішні параметри моделі, відрізки – допоміжні параметри і константи.

В чисельних експериментах імітувався біологічний експеримент із «модельною» рослиною ярової пшениці. Обрано наступні початкові значення параметрів з розрахунку на 100 насінин: маса – 3 г, вологість в період посіву – 12 %, вміст запасного крохмалю в ендоспермі в перерахуванні на вуглець – 655 мг, вміст запасного білка в перерахуванні на азот – 76 мг, початкова швидкість гідролізу крохмалю при оптимальних для гідролізу умовах – 170 мг/доба (у перерахуванні на вуглець), гідролізу білка 25 мг/доба (у перерахуванні на азот).

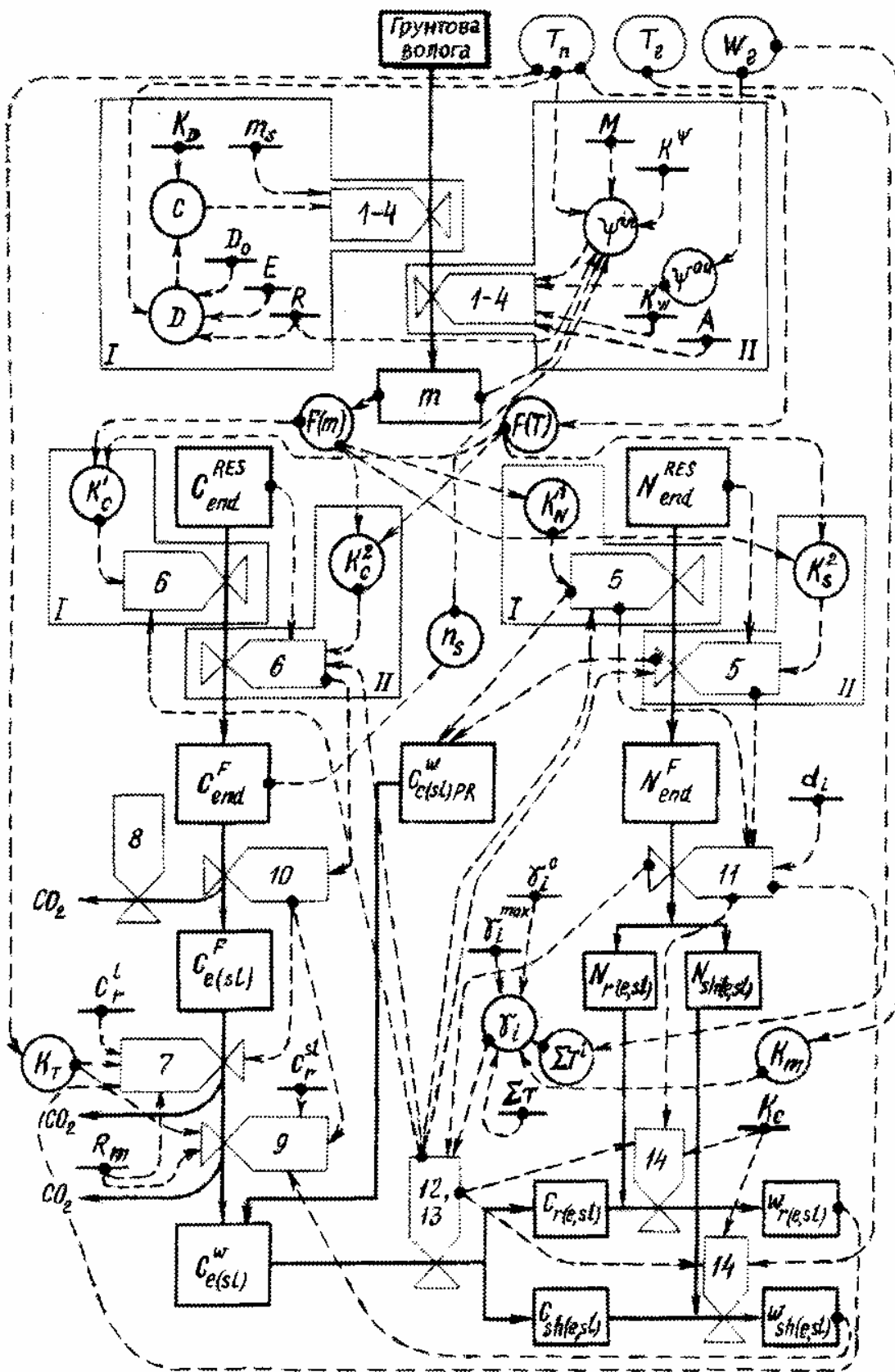


Рис. 1 – Діаграма потоків речовини й інформації в системі «грунт – насіння – паросток» (символіка Форрестера). Умовні позначки в тексті.

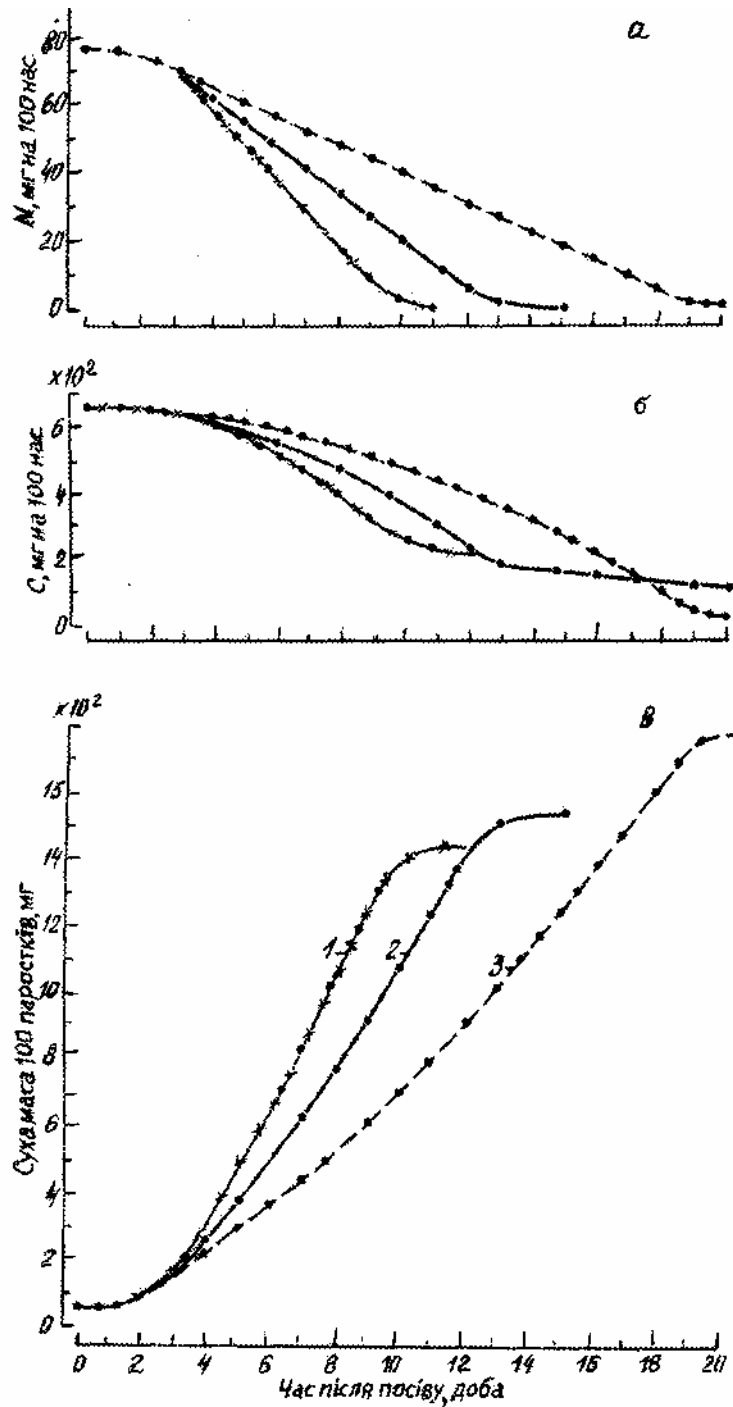


Рис. 2. Вплив температури ґрунту на динаміку витрати запасів білка (а) і крохмалю (б) ендосперму і нагромадження сухої маси (в) паростками: 1 – 20 °С; 2 – 1 °С; 3 – 12 °С.

Досліджувався вплив температури ґрунту на швидкість витрати запасів ендосперму насіння та ріст паростків. Час появи сходів визначався по сумі ефективних температур. Задавались три рівні температури ґрунту, приймалось, що вологість ґрунту оптимальна.

З підвищенням температури збільшувалась швидкість гідролізу запасного білка й крохмалю ендосперму і швидкість нагромадження сухої маси (рис. 2). На момент появи сходів (прорив першим листком колеоптиля) цілком виснажуються запаси білка й в основному запаси крохмалю. Швидкість росту різко знижується і за відсутністю екзогенних джерел азоту ріст припиняється.

Як видно з даних рис. 2, при підвищенні температури ґрунту до 20 °С сходи появляються раніше, але маса паростків менша в порівнянні з варіантом, коли температура ґрунту 12 °С.

Висновки. Розроблена динамічна модель витрати запасів ендосперму і росту паростків за період від посіву до появи сходів. У моделі враховані наступні фізіологічні і біохімічні процеси: поглинання води насінням, дихання насіння й паростка, гідроліз запасних білків і крохмалю ендосперму, мобілізація продуктів гідролізу для росту зародка і паростка в різних умовах навколишнього середовища.

Список літератури

1. *Биология семян и семеноводство.* – М.: Колос, 1976. – 256 с.
2. *Гребинский С.О.* Рост растений. – Львов: Изд-во Львовского университета, 1961. – 296 с.
3. *Джеймс В.* Дыхание растений. – М.: Изд-во иностр. литер., 1956. – 439 с.
4. *Немченко О.А., Мусатенко Л.И.* Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах онтогенеза // Физиология и биохимия культурных растений. – 1982. – Т. 5, № 5. – С. 439–445.
5. *Обручева Н.В., Ковadlo Л.С.* Два этапа усиления дыхания прорастающих семян гороха по мере увеличения их обводненности // Физиология растений. – 1985. – Т. 32, вып. 4. – С. 753–761.
6. *Овчаров К.Е.* Физиология формирования и прорастания семян. – М.: Колос, 1976. – 255 с.
7. *Павлова В.Н.* Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей "погода–урожай" // Труды ВНИИСХМ, 1983. – Вып. 8. – С. 28–36.
8. *Пешикова А.А.* Мобилизация азотсодержащих запасов в связи со скоростью роста паростка // Автореф. дисс... канд.биолог.наук. – Иркутск: 1973. – 15с.
9. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 319 с.
10. *Строганова М.А., Сунцева Н.А.* Динамическая модель роста проростков зерновых культур в период посев – всходы // Труды ВНИИСХМ, 1983. – Вып. 8. – С. 36–45.
11. *Wanjura D.F., Buxton D.R., StarLeon H.N.* A model for describing cotton growth during emergence. – Trans. ASAE, 1973/ –V. 16, N 2. – P. 227–231.

Динамическая модель прорастания семян и формирования всходов зерновых культур.

Полевой А.Н.

Разработана динамическая модель, описывающая физиологические и биохимические процессы, которые протекают в растении в период от посева до появления всходов. Структура модели представлена системой дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: семена, эндосперм, зародыш, рост, дыхание, гидролиз, белок, крахмал, углеводы, сухая масса, всходы.

Dynamic model of germination of seeds and formations of grain crops shoots. Polevoy A.

The dynamic model describing physiological and biochemical processes which proceed in a plant during the period from crop before occurrence of shoots is developed. The structure of model is submitted by system of the differential equations.

Key words: seeds, endosperm, germ, growth, breath, hydrolysis, protein, starch, carbohydrates, dry weight, shoots.