

УДК 63:631.5:633.11:551.5

В.С. Антоненко, д. геогр. н., с.н.с.

*Український науково-дослідницький гідрометеорологічний інститут
Міністерства надзвичайних ситуацій України*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОЦЕСС ЗАКАЛИВАНИЯ И ПЕРЕЗИМОВКУ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Предложена субмодель процесса закаливания и перезимовки озимой пшеницы как составная часть комплексной динамической модели роста, развития и формирования продуктивности культуры.

Ключевые слова: *модель, озимая пшеница, закаливание, перезимовка, рост, развитие, растение, фотосинтез, дыхание, продуктивность*

В настоящее время разработано множество математических моделей формирования урожая озимой пшеницы, существенно различающихся по детализации и сложности описания моделируемых процессов. Для этих разработок характерны два подхода. В рамках первого созданы модели расчета урожайности с учетом гидрометеорологических факторов, в которых учитывается, главным образом, влияние температуры и осадков отдельных периодов вегетации на урожайность озимой пшеницы [2 и др.]. Второй подход предусматривает создание моделей, которые количественно описывают отдельные этапы жизнедеятельности растений [1,5,8,13 и др.].

Жизненный цикл культуры озимой пшеницы делится на несколько важных этапов, которые значительно отличаются друг от друга по протеканию биологических процессов и типу обмена веществ в растении, а также влиянию агрометеорологических условий на эти процессы. Выделяют основные этапы жизненного цикла озимой пшеницы: прорастания семени и формирования всходов, осенней вегетации и закаливания растений, перезимовки, весенне–летней вегетации.

В рамках комплексных моделей или как самостоятельные модели разработаны модели прорастания семян [13 и др.], моделируется процесс роста и развития озимой пшеницы в осенний период [3], предложены модели динамики морозоопасности озимых культур [10,11 и др.], рассматривается моделирование формирования продуктивности озимой пшеницы в весенне–летний период [1, 5, 8,12, 13 и др.]. Данные математические модели созданы для разных уровней сложности, предполагают использование различного рода входной информации и их стыковка для описания всего жизненного цикла с целью использования в практике является весьма проблематичной.

Для применения в практике агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства подобные модели должны обладать некоторыми особенностями. С одной стороны, – они должны быть достаточно сложными, чтобы правильно описывать рассматриваемые процессы; с другой стороны, – достаточно просты для идентификации их параметров и в требованиях к входной информации, в качестве которой может рассматриваться только оперативная ежедневная и декадная агрометеорологическая информация.

Несмотря на многочисленные исследования влияния агрометеорологических условий на перезимовку озимых культур, создание динамической модели

формирования зимостойкости и динамики морозоопасности озимой пшеницы, адекватно описывающей моделируемый процесс с удовлетворяющей практикую точностью и надежностью в рамках комплексной модели формирования продуктивности посева, является достаточно сложной задачей.

Предлагаемая в данной статье модель процесса закаливания и перезимовки озимой пшеницы рассматривается как составная часть комплексной динамической модели роста, развития и формирования продуктивности, описывающей весь жизненный цикл культуры, «от семени до семени».

В качестве теоретической основы при разработке концепции модели нами использованы общебиологические представления и экспериментальные данные о росте, развитии и формировании продуктивности озимой пшеницы, перезимовке растений, влиянии агрометеорологических условий на эти процессы, изложенные в многочисленных научных литературных источниках.

Основные положения этой концепции заключаются в следующем:

- процессы роста и развития моделируются с учетом биологических особенностей растений и в зависимости от влияния агрометеорологических условий и рассматриваются как процессы формирования надземных и подземных органов растений;

- в качестве элементарной единицы роста рассматривается формирование побега (главного и боковых) и его первичной и вторичной корневой системы;

- моделирование распределения ассимилятов основано на синтезе концепции функционального равновесия между надземной и подземной частью растений и принципа приоритетности в распределении продуктов фотосинтеза и распада между отдельными побегами;

- влияние влаго-температурного режима на интенсивность фотосинтеза рассматривается по принципу Либиха с учетом коррекции на сочетание экстремальных температур и экстремальных условий увлажнения;

- в основе закономерности формирования побега лежит согласованность и скоординированность роста вегетативных органов с репродуктивными – продолжительность роста одних органов всегда определяется продолжительностью формирования и роста других органов.

При моделировании процесса закаливания и перезимовки озимой пшеницы выделены два периода в жизнедеятельности озимой пшеницы, существенно различающиеся процессами метаболизма в отдельных органах растения:

- период формирования зимостойкости – перестройка процессов обмена и прохождение двух фаз закаливания в период осенней вегетации;

- период перезимовки растений, когда происходит гидролиз дисахаридов в моносахара и их расход на дыхание, формируется критическая температура вымерзания и определяется число перезимовавших стеблей.

Естественно, что во второй половине осени ход снижения среднесуточного уровня термического режима и, в особенности, в ночные вызывает торможение ростовых процессов, в то время как в светлое время суток на фоне положительных температур наблюдается интенсивный процесс фотосинтеза – начинается подготовка растений озимой пшеницы к перезимовке. Процесс закаливания делится на фазы [16]: первая протекает в условиях хорошего освещения при понижении средней суточной температуры воздуха до 0 – 6 °С, а вторая начинается уже после перехода температуры воздуха через 0 °С в сторону отрицательных температур. Известно [5], что фотосинтез озимой пшеницы идет и при температуре воздуха -6, -8 °С. Образующийся избыток

продуктов фотосинтеза, не використовуваний на ростові процеси, веде до утворенню і накопленню сахарів в листках і вузлах кущення. У озимих пшениц накоплюються переважно дисахариди (сахароза) і моносахариди (глюкоза) [6].

Для розрахунку інтенсивності фотосинтезу листків нами використовувалася формула, запропонована в роботі [15]. В цю формулу були введені додатково функції, що відображають вплив на інтенсивність фотосинтезу забезпеченості рослин азотом, а також враховують вплив вологотемпературного режиму на швидкість процесу фотосинтезу:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\tau_c C_a k_N}{k_{PII}} \left\{ I_n \left[\frac{k_{PII} I_0 \alpha + \tau_c C_a k_N (1 - k_L)}{k_{PII} I_0 \alpha \exp(-k_L L) + \tau_c C_a k_N (1 - k_L)} \right] \right\} k_{WT}, \quad (1)$$

де $\frac{d\Phi}{dt}$ – інтенсивність фотосинтезу листків;

τ_c – коефіцієнт потенціальної провідності CO₂;

C_a – концентрація CO₂ в атмосфері;

k_N – коефіцієнт забезпеченості рослин азотом;

k_{PII} – коефіцієнт ослаблення радіації рослинним покривом;

I_0 – інтенсивність фотосинтетически активної радіації (ФАР) над посівом;

α – нахил світлової кривої фотосинтезу;

k_L – коефіцієнт пропускання ФАР листками;

L – відносна площа листової поверхності посіву;

k_{WT} – узагальнена функція впливу вологозабезпеченості посівів і температури повітря на фотосинтез.

Узагальнена функція k_{WT} визначається як деяка комбінація функцій впливу вологозабезпеченості посівів ($k_{\Phi}(W)$) і впливу температурного режиму повітря на фотосинтез ($k_{\Phi}(t_e)$). Виходячи з принципу Лібиха

$$k_{WT} = \min \{k_{\Phi}(W), k_{\Phi}(t_e)\}. \quad (2)$$

При цьому визначається по такому принципу коефіцієнту лімітування вводиться в відповідності з [14] корегуюча поправка. Її існування заключається в тому, що при одночасному впливі високої температури і засухи або низької температури і надлишку вологи вплив лімітуючих факторів на продуктивність рослин посилюється, а при високій температурі і надлишку вологи або низькій температурі і засухі послаблюється. З урахуванням таких вологотемпературних умов буде визначатися лімітуючий фактор:

$$\left. \begin{aligned} & k_{WT} \left\{ 1 - \left[1 - k_{\Phi}(t_e) \right] \left[1 - k_{\Phi}(W) \right] \right\} \\ & \text{при } t_e < t_e^{opt} \text{ и } W > W_2^{opt} \text{ или } t_e > t_e^{opt} \text{ и } W < W_2^{opt} \\ & k_{WT} \left\{ 1 + \left[1 - k_{\Phi}(t_e) \right] \left[1 - k_{\Phi}(W) \right] \right\} \\ & \text{при } t_e < t_e^{opt} \text{ и } W < W_2^{opt} \text{ или } t_e > t_e^{opt} \text{ и } W > W_2^{opt} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де t_e^{opt} – оптимальна для фотосинтезу температура повітря;

W_1^{opt}, W_2^{opt} – оптимальні межі вологості ґрунту.

При описанні динаміки формування надземної і підземної частин рослин нами використана концепція існування функціонального рівноважжя між цими частинами рослин, вперше реалізована в роботах [15,17] в вигляді блоків моделей, отримавших назву: моделі типу "shoot: root". Відношення цих частин

определяется режимом увлажнения почвы и уровнем минерального питания:

$$\gamma_{надз} = \gamma_{надз}^{pot} k_{надз}(W) k_{надз}(NPK), \quad (4)$$

где $\gamma_{надз}$ – ростовая функция надземной части растений;

$\gamma_{надз}^{pot}$ – потенциальное значение ростовой функции надземной части растений;

$k_{надз}(W)$ и $k_{надз}(NPK)$ – функции влияния соответственно влагообеспеченности посевов и обеспеченности элементами минерального питания на соотношение надземной и подземной части растений.

Вслед за определением соотношения $\gamma_{надз}$ опишем динамику биомассы надземной и подземной части растений озимой пшеницы уравнениями вида:

$$\frac{dm_{надз}}{dt} = \left(\phi - \frac{dR}{dt} \right) \gamma_{надз} \quad (5)$$

и

$$\frac{dm_{подз}}{dt} = \left(\phi - \frac{dR}{dt} \right) (1 - \gamma_{надз}), \quad (6)$$

где $\frac{dm_{надз}}{dt}$ и $\frac{dm_{подз}}{dt}$ – прирост массы соответственно надземной и подземной части растений;

$\frac{dR}{dt}$ – дыхание растений, определяемое как состоящее из двух компонентов [12,

15] – дыхания роста и дыхания поддержания структур:

$$\frac{dR}{dt} = D_M [c_m MQ_R(t_g) + c_G \Phi], \quad (7)$$

где D_M – параметр старения растений, отражающий изменение дыхательной активности растений в жизненном цикле;

c_m и c_G – коэффициенты дыхания соответственно поддержания и роста;

M – масса растений.

Закаливание растений. Нами моделируется наступающее после устойчивого перехода температуры воздуха через 6 °С изменение механизма распределения ассимилятов между продолжающими замедленный рост органами растений и создания резервного фонда ассимилятов, превращающегося в сахара. При этом количество продуктов фотосинтеза сравнивается с рассчитанной максимально возможной величиной прироста надземной $G_{надз}^{max}$ и подземной $G_{подз}^{max}$ биомассы, которые определяются по уравнениям, аналогичным (8):

$$G_{n,i}^{max} = (m_{n,i} \cdot G_{n,i}^{pot}) \min \{ k_{n,i}(t_g), k_{n,i}(W) \}, \quad (8)$$

где $G_{n,i}^{max}$ – максимально возможный в данных условиях прирост биомассы i -х побегов;

$m_{n,i}$ – биомасса i -х побегов;

$G_{n,i}^{pot}$ – потенциальный относительный прирост биомассы i -х побегов;

$k_{n,i}(t_g)$ и $k_{n,i}(W)$ – функции влияния соответственно температуры воздуха и увлажнения почвы на рост i -х побегов.

Вероятно, можно предположить две ситуации:

$$\Phi > G_{\text{надз}}^{\text{max}} + G_{\text{подз}}^{\text{max}} \quad (9)$$

и

$$\Phi < G_{\text{надз}}^{\text{max}} + G_{\text{подз}}^{\text{max}} \quad (10)$$

В первом случае прирост массы надземной и подземной части растений определяется как

$$\frac{dm_{\text{надз}}}{dt} = G_{\text{надз}}^{\text{max}} \quad (11)$$

и

$$\frac{dm_{\text{подз}}}{dt} = G_{\text{подз}}^{\text{max}} \quad (12)$$

Во второй ситуации, описываемой соотношением (10), при описании динамики прироста массы надземной и подземной части растений учитывается отношение максимально возможной величины прироста отдельной части растений к сумме максимальных приростов обеих частей:

$$\frac{dm_{\text{надз}}}{dt} = \left(\frac{G_{\text{надз}}^{\text{max}}}{G_{\text{надз}}^{\text{max}} + G_{\text{подз}}^{\text{max}}} \right) \Phi - \frac{dR_{\text{надз}}}{dt}; \quad (13)$$

$$\frac{dm_{\text{подз}}}{dt} = \left(\frac{G_{\text{подз}}^{\text{max}}}{G_{\text{надз}}^{\text{max}} + G_{\text{подз}}^{\text{max}}} \right) \Phi - \frac{dR_{\text{подз}}}{dt}. \quad (14)$$

Прирост массы главного побега, боковых побегов, первичной и вторичной корневой системы, узла кущения определяются выражениями аналогичными (9) – (14).

Избыток продуктов фотосинтеза по условию (9) определим как разность

$$\frac{dm_{\text{рез}}}{dt} = \Phi - (G_{\text{надз}}^{\text{max}} + G_{\text{подз}}^{\text{max}}), \quad (15)$$

где $\frac{dm_{\text{рез}}}{dt}$ – резерв продуктов фотосинтеза, образующийся после удовлетворения потребности подземной и надземной части растений в ассимилятах для максимально возможного в складывающихся на фоне снижения среднесуточных температур условиях роста.

Концентрация возникающих резервных продуктов фотосинтеза определится как отношение

$$mc_{\text{рез}} = \frac{m_{\text{рез}}}{M}, \quad (16)$$

где $mc_{\text{рез}}$ – концентрация избытка продуктов фотосинтеза в растениях.

Процесс образования дисахаридов в надземной части и узле кущения растений определим по уравнениям типа Михаэлиса–Ментен:

$$\frac{dCD_{\text{надз}}}{dt} = \frac{\frac{dCD_{\text{надз}}^{\text{pot}}}{dt} \cdot mc_{\text{рез}}}{mc_{\text{рез}} + K_{\text{надз}}^{M-M}} \quad (17)$$

и

$$\frac{dCD_{\text{у.к}}}{dt} = \frac{\frac{dCD_{\text{у.к}}^{\text{pot}}}{dt} \cdot mc_{\text{рез}}}{mc_{\text{рез}} + K_{\text{у.к}}^{M-M}}, \quad (18)$$

где $\frac{dCD_{\text{надз}}}{dt}$ и $\frac{dCD_{\text{у.к}}}{dt}$ – скорость образования дисахаридов соответственно в

надземной части и узле кущения растений;

$\frac{dCD_{надз}^{pot}}{dt}$ и $\frac{dCD_{надз}^{pot}}{dt}$ – потенциальная скорость образования сахаров соответственно в надземной части и узле кущения растений;

$K_{надз}^{M-M}$ и $K_{у.к.}^{M-M}$ – константы Михаэлиса–Ментен для надземной части и узла кущения растений.

Аналогичным образом определяется скорость накопления моносахаров в надземной части $\frac{dCM_{надз}}{dt}$ и в узле кущения $\frac{dCM_{у.к.}}{dt}$.

Во вторую фазу закаливания рост надземных и подземных органов отсутствует, в связи с этим формула (15) приобретает вид:

$$\frac{dm_{рез}}{dt} = \Phi . \quad (19)$$

Образование дисахаридов и моносахаров в этот период моделируется уравнениями, аналогичными (17) – (18).

Перезимовка растений. В зимующих растениях озимой пшеницы, находящихся в состоянии покоя, даже при низких температурах обмен веществ не прекращается. В этот период происходит гидролиз сложных сахаров и существенно увеличивается доля моносахаров, оказывающих большое влияние на формирование зимостойкости. Наблюдается расход сахаров на дыхание поддержания растительных тканей, происходит перемещение сахаров из надземной части в узел кущения, при оттепелях активизируется процесс роста, что вызывает дополнительный расход запасов растворимых углеводов. В последующем, при постепенном снижении температуры наблюдается повторное закаливание растений. При этом формируется уже более низкий уровень морозостойкости по сравнению с первоначальным уровнем. Повторные оттепели вызывают новое прохождение этого процесса, что приводит к постепенному снижению морозостойкости к концу зимы.

Процесс гидролиза дисахаридов на моносахара в узле кущения опишем уравнением ферментативной кинетики с учетом влияния низких отрицательных температур на интенсивность процесса:

$$\frac{dCD_{у.к.}^{зудр.}}{dt} = K_{у.к.}^{зудр.} CD_{у.к.} k_{у.к.}^{зудр.}(t_n), \quad (20)$$

где $\frac{dCD_{у.к.}^{зудр.}}{dt}$ – скорость гидролиза дисахаридов в узле кущения;

$K_{у.к.}^{зудр.}$ – коэффициент скорости гидролиза;

$CD_{у.к.}$ – содержание дисахаридов в узле кущения;

$k_{у.к.}^{зудр.}(t_n)$ – функция влияния температуры почвы на глубине узла кущения на

скорость гидролиза дисахаридов.

Синтез дисахаридов из моносахаров в узле кущения опишем уравнением типа Михаэлиса–Ментен:

$$\frac{dCD_{у.к.}^{сум.}}{dt} = \frac{\frac{dCD_{у.к.}^{pot}}{dt} \cdot CM_{у.к.} \cdot k_{у.к.}^{сум.}(t_n)}{CM_{у.к.} + K_{у.к.}^{M-M}}, \quad (21)$$

–

где $\frac{dCD_{у.к.}^{синт.}}{dt}$ – интенсивность синтеза дисахаридов из моносахаров в узле кущения;

$\frac{dCD_{у.к.}^{пот}}{dt}$ – потенциальная скорость синтеза дисахаридов;

$CM_{у.к.}$ – концентрация моносахаров в узле кущения;

$k_{у.к.}^{синт.}(t_n)$ – функция влияния температуры почвы на глубине узла кущения на скорость синтеза дисахаридов.

В надземной части растений интенсивность гидролиза дисахаридов будет определяться более низким уровнем температуры воздуха. Определим для надземной части растений скорость гидролиза дисахаридов $\frac{dCD_{надз}^{гидр.}}{dt}$ и скорость синтеза дисахаридов $\frac{dCD_{надз}^{синт.}}{dt}$ по формулам, аналогичным (20) – (21).

Таким образом, баланс дисахаридов в узле кущения определяется как разность двух, идущих на фоне разного хода температур воздуха, противоположных процессов – гидролиза дисахаридов и их синтеза:

$$\frac{dCD_{у.к.}}{dt} = \frac{dCD_{у.к.}^{синт.}}{dt} - \frac{dCD_{у.к.}^{гидр.}}{dt} \quad (22)$$

Скорость изменения содержания моносахаров в узле кущения будет определяться разностью скорости их поступления (за счет гидролиза дисахаридов, а также поступления из надземной части растений) и скорости их расходования на синтез дисахаридов и затрат на дыхание поддержания:

$$\frac{dCM_{у.к.}}{dt} = \frac{dCD_{у.к.}^{гидр.}}{dt} + \gamma_{у.к.}^{CM} CM_{надз} - \frac{dCD_{у.к.}^{синт.}}{dt} - \frac{dR_{у.к.}}{dt}, \quad (23)$$

где $\frac{dCM_{у.к.}}{dt}$ – скорость изменения содержания моносахаров в узле кущения;

$\gamma_{у.к.}^{CM}$ – функция перемещения моносахаров из надземной части в узел кущения;

$CM_{надз}$ – содержание моносахаров в надземной части;

$\frac{dR_{у.к.}}{dt}$ – затраты на дыхание поддержания жизнедеятельных структур узла кущения.

В надземной части растений на фоне более низких температур воздуха протекают процессы, которые описываются уравнениями, аналогичными (20) – (23), что позволяет определить суммарное содержание дисахаридов $CD_{надз}$ и моносахаров $CM_{надз}$.

Таким образом, уравнения (20) – (23) описывают процессы превращения углеводов в зависимости от складывающихся условий (чередование периодов снижения температуры, оттепелей, последующего снижения температуры).

Баланс содержания суммы сахаров в органах озимой пшеницы запишем в виде:

$$\frac{dC_{надз}}{dt} = \frac{dCD_{надз}}{dt} + \frac{dCM_{надз}}{dt}, \quad (24)$$

$$\frac{dC_{y.к.}}{dt} = \frac{dCD_{y.к.}}{dt} + \frac{dCM_{y.к.}}{dt}, \quad (25)$$

где $\frac{dC_{надз}}{dt}$ и $\frac{dC_{y.к.}}{dt}$ – скорость изменения содержания суммы сахаров соответственно в надземной части и узле кущения растений.

Уравнения (24) и (25) позволяют определить динамику содержания суммы сахаров в органах растений в период их зимовки.

В работе [4] показано, что между содержанием суммы сахаров в узле кущения и критическими температурами вымерзания имеется достаточно тесная связь:

$$T_{y.к.}^{crit} = -0,47C_{y.к.} - 3,0, \quad (26)$$

где $T_{y.к.}^{crit}$ – критическая температура вымерзания на глубине узла кущения растений;

$C_{y.к.}$ – содержание суммы сахаров в узле кущения.

Расчет критической температуры вымерзания $T_{y.к.}^{crit}$ по содержанию суммы сахаров в узле кущения $C_{y.к.}$ с помощью уравнения (26) позволяет использовать эту величину при расчете показателей морозоопасности [7, 9].

Наиболее важным при оценке зимовки озимой пшеницы является определение количества перезимовавших растений. Результаты исследований, выполненных в [5] показывают, что существует тесная связь между числом перезимовавших растений и содержанием суммы сахаров в узле кущения за полторы–две недели до возобновления вегетации, когда содержание сахаров в узле кущения, как правило, бывает минимальным:

$$k_{зим.} = \frac{(C_{y.к.}^{min})^2}{0,0172 + 0,87(C_{y.к.}^{min})^2}, \quad (27)$$

где $k_{зим.}$ – коэффициент перезимовки;

$(C_{y.к.}^{min})$ – минимальное содержание суммы сахаров в узле кущения растений.

Таким образом, расчет динамики сахаров в зимний и в ранне-весенний периоды позволяет определить число перезимовавших растений ($N_{p,вес.}$) и их параметры на начало весенне-летней вегетации путем умножения числа ушедших в зиму растений ($N_{p,осен.}$) на коэффициент перезимовки.

Список литературы

1. Антоненко В.С. Аэрокосмический мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине. – К.: АртЭк, 2002. –312 с.
2. Дмитренко В. П. О моделях расчета урожайности с.-х. культур с учетом гидрометеорологических факторов //Метеорология и гидрология. 1971, № 5. –С. 84–91.
3. Долгий–Трач В. А., Федорова А. И. Моделирование процессов роста и развития озимой пшеницы в осенний период //Труды ВНИИСХМ. – 1990. – Вып. 26. – С. 59–69.
4. Желудкова Т. П., Сережина А. Я. О расчете критической температуры вымерзания озимой пшеницы в нечерноземной зоне //Труды ВНИИСХМ. – 1987. –Вып. 19. – С. 133–137.
5. Ковтун И. И., Гойса Н. И., Митрофанов Б. А. Оптимизация условий возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.
6. Куперман Ф. М. Физиология устойчивости пшеницы. //Физиология

сельскохозяйственных растений. – Изд. МГУ, 1969, – Т. 4. – С. 401–497.

7. Личикаки В. Н. Перезимовка озимых культур. – М.: Колос, 1974. – 207с.

8. *Моделювання* роста и продуктивности сельскохозяйственных культур /Под ред. Ф. В. Т. Пеннинга де Фриза и Х. Х. Лаара. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 320 с.

9. Моисейчик В. А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 295 с.

10. Новикова Л. Ю. Математическая модель динамики морозостойкости озимых культур //Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Санкт–Петербург, 1994. – 20 с.

11. Палагин Э. Г., Моисейчик В. А. Методика расчета на ЭВМ термического режима почвы и прогноза перезимовки озимых зерновых культур. //Методическое пособие. – М.: Гидрометеиздат, 1978. – 38 с.

12. Полевой А. Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 175 с.

13. Полевой А. Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 319 с.

14. Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 264 с.

15. Торнли Дж. Г. М. Математические модели в физиологии растений. – К.: Наукова Думка, 1982. – 310 с.

16. Туманов И. И. Физиологические основы зимостойкости культурных растений. – М.: Сельхозгиз, 1970. – 469 с.

17. Reynolds J. F., Thornley J. H. M. A shoot: root partitioning model. //Ann. Bot., 1982, v. 49, т. 5. – P. 585–597.

Моделювання впливу агрометеорологічних умов на процес загартування та перезимівлю озимої пшениці. Антоненко В.С.

Запропоновано субмодель процесу загартування та перезимівлі озимої пшениці як складової частини комплексної динамічної моделі росту, розвитку і формування продуктивності культури.

Ключові слова: модель, озима пшениця, загартування, перезимівля, ріст, розвиток, рослина, фотосинтез, дихання, продуктивність

Modelling of influence agrometeorological conditions on process of frost resistance and wintering of the winter wheat. V. Antonenko

The submodel of process of frost resistance and wintering of the winter wheat as a component of complex dynamic model of growth, development and formation of the crop production.

Keywords: model, winter wheat, frost resistance, wintering, growth, development, plant, photosynthesis, respiration, production