

УДК 631.483

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВСХОДОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Полевой А.Н.¹⁾, д. геогр. н., профессор,
Синицына В.В.²⁾

¹⁾Одесский государственный экологический университет
ул. Львовская, д. 15, 65016, Одесса, Украина, apolevoy@te.net.ua,
²⁾victoria.sinitsyna@gmail.com

Рассматривается процесс прорастания семян и формирования всходов зерновых культур, обусловленные факторами окружающей среды. Описано влияние температуры и влажности почвы на скорость протекающих в семени процессов, а также на появление всходов при разной плотности почвы.

Ключевые слова. Семя, эндосперм, зародыш, проросток, колеоптиль, гидролиз, дыхание, белок, углеводы, плотность почвы, всходы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Первым критическим периодом для растений является развитие от посева до всходов. От того, при каких условиях проходит этот период, зависит всё дальнейшее вегетативное и репродуктивное развитие и, в конечном итоге, формирование урожая. Математическое описание и моделирование процесса прорастания семян дает возможность получения данных о сроках появления всходов, оценки качества и полноты всходов и их прогнозирования. В существующих моделях типа «погода – урожай» период от посева до всходов представлен как блок (или субмодель). Поэтому от адекватности результатов работы этого блока зависит точность прогнозирования всего последующего вегетационного периода.

Целью исследования является рассмотрение существующих подходов к моделированию периода от посева до всходов зерновых культур, моделирование процессов, происходящих в семени при прорастании под воздействием факторов среды, формирования всходов, описание структуры разработанной модели периода посев – всходы, а также результатов проведенных численных экспериментов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проблема моделирования и прогнозирования урожайности в той или иной степени рассматривается многими учеными всех стран с развитым сельским хозяйством. На сегодняшний день известно большое количество моделей развития и формирования

продуктивности различных сельскохозяйственных культур. В большинстве этих моделей ранние этапы развития растений практически не рассматриваются или же существуют как составные блоки моделей «погода – урожай», но выделяются и некоторые самостоятельные модели.

Модели учитывают широкий спектр факторов окружающей среды, влияющих на прорастание, хотя существуют и более простые модели, учитывающие влияние лишь нескольких факторов. Такие модели являются удобными в применении, но порой уступают в точности многофакторным моделям. Однако, нельзя однозначно сказать, какие из них лучше применять на практике, каждая из них имеет свои, присущие ей преимущества и недостатки.

В качестве входной информации модели обычно используют параметры почвы (ее влажность, температуру, водной потенциал, плотность и т.п.) и характеристики посевного материала (масса и размеры семени, содержание влаги в семени, его водный потенциал, проницаемость оболочек семян и т.д.). Результатом расчетов моделей являются сроки и полнота появления всходов.

А.Н. Полевому, М.А. Строгановой и А.И. Коровину [8, 10] в созданной модели удалось подробно описать физиолого-биохимические процессы в семени в период от посева до появления всходов. Модель состоит из блоков, описывающих каждый из этих процессов. Поскольку гидролиз, дыхание и последующий рост регулируются влажностью семян, поэтому в начальном блоке модели учтена также скорость накопления влаги

(dm/dt) , которая рассматривается как состоящая из фаз простой диффузии и осмоса; она представлена уравнением

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

где m – количество поглощенной воды в момент t ; c – коэффициент скорости набухания; m_s – максимальное количество воды, которое может быть поглощено путем диффузии; k_w – коэффициент проницаемости; A – коэффициент, характеризующий размеры семени; ψ^{out}, ψ^{in} – водные потенциалы почвы и семян; m_0 – содержание влаги в семени при посеве; m_{crit}^1, m_{crit}^2 – критические значения влажности, определяющие начало гидролиза и время прорастания семян.

Упрощенные модели ранних этапов развития зерновых рассматривают динамику процессов, происходящих в семенах, как перераспределение масс между запасными и растущими органами. В таком случае учитывается только физика процесса прорастания.

Модель В.Н. Павловой [6] описывает набухание зерновки следующим образом

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

где θ – влажность зерна в j -е и $(j+1)$ -е сутки; δ_w – единичная функция, равная единице в диапазоне доступной влаги и нулю – вне этого диапазона; $\xi(T), \eta(j)$ – функции, учитывающие влияние окружающей среды; θ_s – влажность зерна, при которой семя наклеивается. Расчет ведется пока $\theta^{j+1} \leq \theta_s$.

Динамику массы зерновки, корня и побега согласно Павловой можно описать следующей системой уравнений:

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

где m_p ($P \in S, h, r$) – масса органа в j -е и $(j+1)$ -е сутки; R_0 – коэффициент дыхания поддержания; φ_T – температурный коэффициент дыхания; $\alpha_h(T, W)$ – доля питательных веществ, направленных на рост; Δm_s^j –

изменение массы зерна за j -е сутки.

Модель прорастания и формирования всходов также предложил В.С. Антоненко [1]. В ней учтены водные потенциалы семян и почвы, гидролиз запасных веществ и дыхание зерновки и проростка. Скорость гидролиза ($dm_{сем}^{здр}/dt$) в модели описана с учетом влияния температуры почвы на глубине заделки семян, которое учитывается с помощью функции $k_{сем}(T_n)$

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

где $K_{сем}^{здр}$ – коэффициент скорости гидролиза; $m_{сем}$ – масса семени.

Расходы на дыхание семян ($dR_{сем}/dt$) здесь представлены в виде уравнения

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

где c_m – коэффициент затрат дыхания поддержания; $Q_R(T_n)$ – функция влияния температуры почвы на интенсивность дыхания семян. Часть питательных веществ, оставшихся после затрат на дыхание, является резервом для роста корня и coleoptilya.

О.А. Немченко и Л.И. Мусатенко рассматривают рост и метаболизм растений на ранних этапах органогенеза [4], разделяя их на три основные составляющие: гидролиз запасных веществ и образование фондов, транспорт фондовых веществ в проростки, синтез из них новой структурной фитомассы. Из структурных веществ в модель были включены сложные углеводы и белки. В каждом компартменте выделено два фонда лабильных веществ – фонд углеводов, состоящий из моно- и олигосахаридов, и фонд азота, который состоит из аминокислот.

Поддержание жизнеспособности семян и проростков, включающие белковый обмен, и поддержка ионного градиента на мембранах требует затрат энергии, которые учитываются в модели посредством дыхания поддержки. Затраты энергии, необходимые для создания новой структурной массы, характеризуются здесь дыханием роста.

Согласно [7], динамику роста основных биометрических показателей модели можно описать следующей системой дифферен-

циальных уравнений:

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

где B_l, B_r, B_{st} – сухая биомасса побега, корня и всего проростка, L_l, L_r – длина листа и корня, BL_l, BL_r – коэффициент конверсии сухой структурной биомассы в длину для побега и корня.

Алгоритм ростовой регуляции, выраженный с помощью переменной SHARE, приобретает значение от 0 до 1. Вся модель разделена на последовательные подмодели: поглощение воды семенами, углеводно-азотного метаболизма, углеводно-азотного взаимодействия в эндосперме, углеводно-азотного взаимодействия в проростке.

В работе [17] был проведен ряд экспериментов по проращиванию семян в закрытом грунте, на основе которых была определена общая бета-функция, описывающая зависимость скорости прорастания GR от температуры T

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

На основе регрессионного анализа было определено значение параметров бета-функции: $\mu = -8,0166$, $\alpha = 1,80$ и $\beta = 0,72$. Для определения оптимальной температуры T_0 и оптимального значения DDR (уровень ежедневного развития) T_0 (DDR_0) бета-функции были использованы следующие уравнения:

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

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

Установлено, что при оптимальной температуре скорость прорастания при T_0 составляет около 0,9 относительных единиц в день.

В исследованиях [15] предлагается определять скорость прорастания семян при помощи уравнения

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

где N_j – количество проросших семян за d_j дней после первоначального полива (посадки) и j – номер наблюдения.

CGV изменяется в пределах от 0 до 1. Кроме того, определяется индекс температуры прорастания GTI .

Уровень прорастания при нормальных условиях GR_i^{REF} прямо пропорционален количеству дней после посадки DAP_i

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

Время появления всходов (ER_i) рассчитывается по формуле

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

где ER^{REF} – время появления всходов при нормальных условиях; ETI и EWI – функции влияния температуры и осмотического потенциала на продление осевых органов соответственно.

В работе [16] принято отдельно рассматривать состояние покоя семян. Модель основана на предположении, что для начала развития необходимо накопление «термического времени». Для этого рассчитывается сумма эффективных температур согласно уравнению

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

где TT_{ar} – термическое время развития; T_s – накопление температур; T_1 – критический уровень температуры, при котором развитие не происходит; t_{ar} – время, которое требуется для созревания.

Помимо этого, модель рассчитывает потери после начала развития семени из-за изменения водного потенциала среды, это позволяет получить 50 % проросших семян $\psi_{b(50)}$ что, в свою очередь, является линейной функцией TT_{ar} . Уменьшение $\psi_{b(50)}$ за весь период описывается уравнением

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

Кроме основных факторов почвы, определяющих прорастание семян, в модели учитывается качество почвенного воздуха.

На взятом за основу принципе накопления температур основаны также и прогнозы наступления фазы всходов зерновых культур.

Прогноз сроков появления всходов для кукурузы был разработан Ю.И. Чирковым [11]. Этот метод прогноза также основан на зависимости скорости развития кукурузы от температуры и влажности почвы с учетом глубины заделки семян. Согласно прогнозу погоды и климатическим данным определяется ожидаемый температурный режим ближайших декад [11]. Далее рассчитывается дата накопления суммы температур

$$D = D_1 + \frac{83 + 7(h - 4)}{K_w(t - 8)}, \quad (15)$$

где D – прогнозная дата появления всходов; D_1 – исходная дата по прогнозу; t – средняя температура почвы, h – глубина заделки семян, K_w – коэффициент учитывающий влажность почвы.

Предложенный Ю.И. Чирковым [11] метод прогноза имеет наиболее высокую оправдываемость при учете условий конкретных хозяйств.

В.П. Дмитренко была получена зависимость между продолжительностью периода посев-всходы и средней температурой на основе экспериментальных данных, в которых было исключено случайное влияние влажности почвы, размер семян и глубина его заделки, а также неточность фенологических наблюдений [2]. Отношение наименьшей продолжительности периода развития к продолжительности при данной температуре отображены с помощью скорости развития растений в относительных единицах и описывает, так называемый, коэффициент полезного действия температуры для развития. Относительная скорость суточного развития при данной температуре η_c равна

$$\eta_c = e^{-\frac{1}{a^2 + bt + c}}. \quad (16)$$

Далее в предложенной методике последовательно складываются значения относительной скорости суточного развития, получают суммарный эффект скорости развития растений в зависимости от температурных условий. Принято считать, что термический режим способствовал наступлению той или иной фазы развития, при прочих равных условиях, если величина суммарного эффекта за некоторый период равна или немногим больше единицы. Этот подход позволяет достаточно точно

прогнозировать дату появления всходов с возможным отклонением в 1-3 дня. Незначительная ошибка значений при сравнении с полевыми данными обусловлена, по мнению автора, неточностью проведения фенологических наблюдений, ведь в большинстве полевых книг приводится глазомерная оценка.

За последние несколько десятилетий был создан ряд математических моделей роста сельскохозяйственных культур, таких как CERES, WOFOST, SUCROS, APSIM, InfoCrop т.п., в которых также частично учитываются ранние этапы развития растений [12].

Механистические модели роста используются для исследования процесса усвоения углерода и прироста биомассы. Большинство моделей применимы только к одному виду растений, например, SOYGRO для бобовых, CERES-Maize для кукурузы, CERES-Wheat для пшеницы, WARM для риса. Известны также универсальные модели SUCROS (Simple and Universal Crop growth Simulator), STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard), WOFOST. Преимущества механистических моделей – физическая обоснованность и несколько меньшие требования к объемам калибровочных данных по сравнению со статистическими моделями. К недостаткам рассмотренных моделей следует отнести сложность вычислений.

Достаточно распространенной имитационной моделью формирования урожая является разработанная в США CERES-модель (оценка урожая через синтез ресурсов и окружающей среды) для пшеницы и специализированная для кукурузы CERES-Maize [13]. Помимо того, что CERES-Maize дает полный прогноз урожайности, она также описывает основные этапы развития кукурузы, в частности формирование всходов.

Уровень появления листьев X_n в модели CERES определяется согласно следующего уравнения

$$X_n = A \cdot (CUMDDT)^B, \quad (17)$$

где X_n – число листьев в побеге; $CUMDDT$ – совокупный дневной уровень, рассчитанный как сумма разности между средней суточной температурой и эффективной температурой (8°C); A и B – эмпирические коэффициенты, которые

равны 0,0105 и 1,1116 соответственно.

Это уравнение используется и для определения появления первого листа, т.е. для появления всходов.

Несмотря на то, что эта модель была успешно протестирована на основе данных, полученных в различных почвенно-климатических условиях (Канада, США, Бразилия и др.), следует отметить наличие значительных расхождений рассчитанных по модели и фактических дат появления всходов. В большинстве экспериментов в 50 % случаев согласно прогнозу модели всходы должны были появиться через 3 дня после сева, но фактически они наблюдались через 8 дней, как описано в исторических наборах данных [12].

Задержку появления всходов было достаточно сложно смоделировать с помощью модели CERES-Maize. Поэтому в большинстве случаев в качестве даты наступления фазы всходов была установлена фактическая дата появления всходов. Приведенная выше оценка применения модели для расчета даты появления всходов еще раз подчеркивает необходимость разработки модели развития зерновых на ранних этапах, а именно от посева до появления всходов.

Разработка математического метода расчета и оценки условий формирования всходов, их полноты и времени образования расширяет возможности агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства, позволяет прогнозировать состояние развития культуры и своевременно принимать решения по ведению хозяйства. Представленная ниже модель нацелена на устранение недостатков и усовершенствование предыдущих моделей периода от посева до появления всходов. Разработка настоящей модели выполнена с учетом достигнутого уровня моделирования формирования всходов с внесением определенных модификаций.

На первом этапе модели описывается только поглощение влаги семенами. Начиная с момента, когда уровень влаги зерновки достиг определенного критического значения (crit 1), начинается также расчет скорости гидролиза запасного белка, крахмала и интенсивность дыхания зародыша и эндосперма. Когда влажность семян достигает следующего критического значения (crit 2), начинается рост проростка (органа прорастающего семени, который в свою очередь состоит из зачатков корешка и ростка) и помимо дыхания зародыша уже учитывается также и дыхание

ростка. На этом этапе прекращается расчет влажности семян.

Далее определяется скорость распределения азота и углерода и накопления сухой массы осевыми органами. Для того, чтобы отметить момент появления всходов, параллельно вычисляется длина ростка. Расчет прекращается, когда длина ростка равна заданной глубине заделки семян. Блок-схема модели представлена на рис. 1.

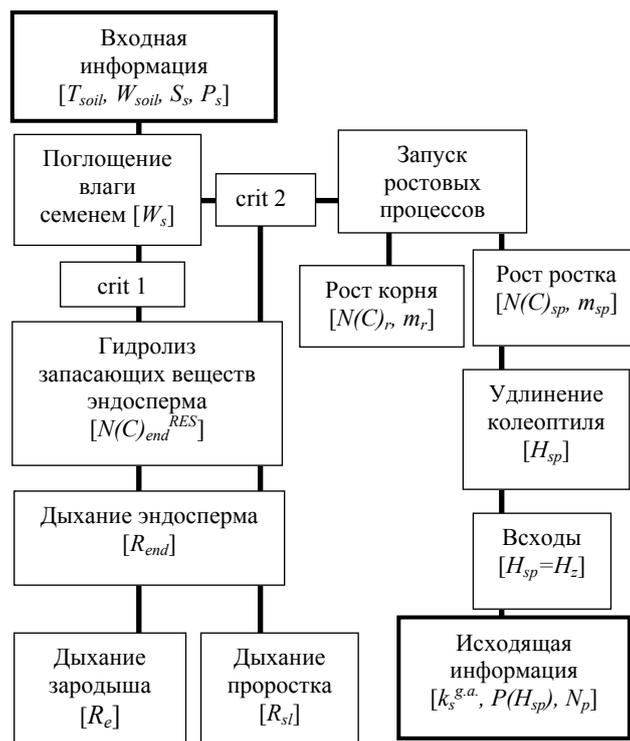


Рис. 1 - Блок-схема модели формирования всходов зерновых культур.

Попав в почву, семена начинают интенсивно поглощать влагу. Этот процесс происходит благодаря разнице водных потенциалов почвы и семян. Уравнение, описывающее процесс накопления влаги семенами, следующее

$$\frac{dW_s}{dt} = S_s P_s (\psi_{soil} - \psi_s), \quad (18)$$

где dW_s/dt – поток влаги в семени; S_s – поглощающая поверхность семени; P_s – проницаемость оболочки семени; ψ_{soil} – водный потенциал почвы; ψ_s – водный потенциал семени.

Водные потенциалы почвы и семени описываются уравнениями:

$$\psi_{soil} = 1,5 \exp\left(-7,76 \frac{W_{soil} - B3}{PB - B3}\right), \quad (19)$$

$$\psi_s = \frac{R_{const} T_{soil}}{\bar{V}_m} \ln m, \quad (20)$$

где W_{soil} – влажность почвы; $B3$ и PB – влажность завядания и полная влагоемкость почвы соответственно; R_{const} – газовая постоянная; T_{soil} – температура почвы на глубине заделки семени; \bar{V}_m – парциальный молярный объем; m – количество поглощенной воды.

Эмпирическая формула (19) была предложена Сиротенко О.Д [9].

Основными частями семян является эндосперм и зародыш. Известно, что белки поглощают воду значительно интенсивнее, чем углеводы. В составе зародыша преобладает запасной белок, поэтому зародыш набухает быстрее, увеличивает свои размеры и образует определенное заострение, выступающее под оболочкой зерна. Это состояние принято называть «наклёвыванием зерна» [5].

Когда влажность семян достигает определенного первого критического значения, начинается гидролиз запасного белка и крахмала

$$\frac{d(N, C)_{end}^{RES}}{dt} = K_s^{zud} m_s k_s(T_{soil}), \quad (21)$$

где $d(N, C)_{end}^{RES} / dt$ – общая скорость гидролиза запасных веществ эндосперма; K_s^{zud} – коэффициент скорости гидролиза запасных веществ семени; m_s – масса семени; $k_s(T_{soil})$ – функция влияния температуры почвы на глубине заделки семян на скорость гидролиза, которая определяется следующей системой уравнений:

$$k_s(T_{soil}) = \begin{cases} 0,058 + 0,773x_1 + 1,913x_1^2 + 5,400x_1^3 - 3,322x_1^4 & \text{при } T < T_{opt1} \\ 1 & \text{при } T_{opt1} \leq T \leq T_{opt2} \\ -11,47 + 29,87x_2^2 + 5,43x_2^3 & \text{при } T > T_{opt2} \end{cases}, \quad (22)$$

$$x_1 = \frac{T - T_{min}}{T_{opt1} - T_{min}},$$

$$x_2 = \frac{T - T_{opt2}}{T_{max} - T_{opt2}},$$

где T – температура почвы; $T_{min(max)}$ –

минимальные и максимальные значения температуры, при которой начинается и прекращается процесс жизнедеятельности; $T_{opt1, opt2}$ – верхняя и нижняя температурные границы оптимума процесса.

В процессе гидролиза запасной крахмал образует фонды лабильных углеводов, запасной белок – фонды лабильных аминокислот эндосперма. Поэтому скорость образования фондов равна скорости гидролиза запасных веществ эндосперма.

Определить содержание азота и углерода отдельно можно исходя из предположения, что их соотношение в эндосперме остается постоянным и может быть выражено с помощью определенного коэффициента α :

$$\frac{dC_{end}^{RES}}{dt} = \alpha \frac{d(N, C)_{end}^{RES}}{dt}, \quad (23)$$

$$\frac{dN_{end}^{RES}}{dt} = (1 - \alpha) \frac{d(N, C)_{end}^{RES}}{dt}, \quad (24)$$

где dC_{end}^{RES} / dt – скорость гидролиза углерода; dN_{end}^{RES} / dt – скорость гидролиза белка.

Вещества, образующиеся в результате гидролиза, до определенного момента расходуются только на дыхание зародыша и эндосперма. Когда влажность семян достигла следующего критического значения, происходит запуск ростовых процессов в семенах. Начинает развиваться проросток, который состоит из корня и ростка (колеоптиля). С этого момента, помимо дыхания зародыша, начинает учитываться интенсивность дыхания осевых органов. Определить интенсивность дыхания эндосперма dR_{end} / dt можно по формуле, предложенной В.С. Антоненко [1]

$$\frac{dR_{end}}{dt} = R_m m_s Q_R(T_{soil}). \quad (25)$$

Скорость дыхания зародыша dR_e / dt в пересчете на интенсивность дыхания эндосперма определим следуя А.И. Носатовскому [5]

$$\frac{dR_e}{dt} = 10 \frac{dR_{end}}{dt}. \quad (26)$$

Интенсивность дыхания ростка и корня опишем следующими формулами:

$$\frac{dR_{sp}}{dt} = \beta \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} Q_R(T_{soil}), \quad (27)$$

$$\frac{dR_r}{dt} = (1 - \beta) \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} Q_R(T_{soil}), \quad (28)$$

где dR_{sp} / dt – скорость дыхания ростка;
 dR_r / dt – скорость дыхания корня;
 β – коэффициент распределения запасов белка на дыхание между coleoptilem и корнем;
 $Q_R(T_{soil})$ – функция влияния температуры почвы на интенсивность дыхания семян, которую можно описать следующим уравнением

$$Q_R(T_{soil}) = 2^{0,1(T - T_{opt})}. \quad (29)$$

Оставшиеся после затрат на дыхание питательные вещества используются для роста корня и coleoptilia

$$\frac{dm_{sp(r)}}{dt} = \left(\gamma \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} + \eta \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} \right) - \frac{dR_{sp(r)}}{dt}, \quad (30)$$

где $dm_{sp(r)} / dt$ – скорость накопления сухой массы ростком (корнем);

γ и η – коэффициенты для пересчета углерода и азота в органическое вещество. На основании проведенных лабораторных экспериментов установлено, что доля coleoptilia в проростке в течении периода от начала роста осевых органов до появления всходов в среднем составляет 40 %.

Coleoptиль представляет собой цилиндр постоянного радиуса на протяжении всего периода. Скорость удлинения coleoptilia, описанная как функция накопления его массы с учетом механического сопротивления почвы, определяется плотностью почвы ρ_{soil} и её влажностью

$$\frac{dH_{sp}}{dt} = \exp\left(\frac{dm_{sp}}{dt} \frac{1}{\rho_{sp}}\right) \frac{1}{\pi r_{sp}^2} k_{sp}(\rho_{soil}) k_{sp}(W_{soil}), \quad (31)$$

где dH_{sp} / dt – скорость удлинения ростка;
 ρ_{sp} – удельная плотность растительной массы ростка;
 r_{sp} – радиус основания ростка;
 $k_{sp}(\rho_{soil})$ – функция влияния плотности почвы на рост ростка;
 $k_{sp}(W_{soil})$ – функция влияния влажности верхних слоев почвы на удлинение ростка.

Принимается, что когда длина ростка H_{sp} становится равной глубине заделки семян, росток достигает поверхности почвы – наблюдаются всходы. Росток прекращает свой рост, а через верхушку coleoptilia появляется первый лист.

Помимо момента появления всходов, необходимо определить полевую всхожесть семян. Уравнение, позволяющее определить эту характеристику, имеет вид [1]

$$k_s^{g.a.} = \frac{W_{0-20}}{a + bW_{0-20}}, \quad (32)$$

где $k_s^{g.a.}$ – коэффициент полевой всхожести семян; W_{0-20} – влажность почвы в пахотном слое; a и b – коэффициенты, определяемые глубиной заделки семян:

$$a = 2,1 + 0,29(H_z)^2, \quad (33)$$

$$b = 1,03 - 0,0127(H_z)^2, \quad (34)$$

где H_z – глубина заделки семян.

Глубина заделки семян может меняться в зависимости от микрорельефа почвы. Согласно модели В.М. Павловой [6], на основе косвенных данных была выбрана функция распределения количества растений с различной глубиной заделки семян

$$P(H_{sp}) = \frac{1}{1,5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H_{sp} - H_z^p)^2}{2,25}}, \quad (35)$$

где H_z^p – наиболее вероятная глубина заделки семян.

После определения H_{sp} на каждом шаге определяется вероятностный интеграл функции плотности нормального распределения. Если значение интеграла функции превышает 0,6, то принимается, что наступили массовые всходы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель была реализована на ПК с помощью программы Microsoft Office Excel. Для идентификации параметров модели была выбрана одна из основных зерновых сельскохозяйственных культур – кукуруза. Большинство начальных параметров были получены в результате проведения эксперимента по проращивания семян кукурузы в лабораторных условиях. Однако, некоторые параметры модели были получены

путем проведения анализа имеющихся в литературе данных, а также за счет оптимизации и ручной подборки численных значений параметров.

Проведен ряд численных экспериментов по исследованию чувствительности модели к изменению параметров окружающей среды во время прорастания семенами. Установлено, что модель чувствительна к изменению температуры на 1 °С, влажности на 1 мм и изменению плотности почвы на 0,1 г/см³. В модели можно варьировать исходные параметры, задавая размер семян и содержание влаги в семени при посеве, изменять тип почвы и ее водно-физические характеристики. В качестве шага во времени выбраны одни сутки. Рассматривался слой черноземной суглинистой почвы толщиной 5 см, ее наименьшая влагоемкость – 10 мм. Оптимальная влажность почвы составляет 8 мм.

Основными агрометеорологическими факторами, влияющими на время появления и полноту всходов, является температура, влажность и плотность почвы. Известно, что процесс появления всходов состоит из двух последовательных фаз: 1) поглощение семенами влаги и их наклеивание, 2) рост побега и достижение им поверхности почвы. Соответственно этим фазам численный эксперимент также был разделен на два этапа: исследование скорости накопления влаги семенами и исследование скорости удлинения coleoptily под воздействием факторов внешней среды.

На первом этапе эксперимента рассматривалось поглощение влаги семенами при различных температурных условиях и увлажнении. При условии, что влажность составляет 7 мм в слое почвы 0–5 см, а температура на протяжении всего периода сохраняется на уровне 22 °С, семена наклеиваются уже за 2 суток (рис. 2). При недостаточной увлажненности этот период составит 3 суток (рис. 3).

С понижением температуры процесс накопления влаги замедляется и может длиться 3–5 суток в пределах оптимального увлажнения почвы и достигать 7 суток – при недостаточном увлажнении. После достижения критического значения влажность семян практически не изменяется.

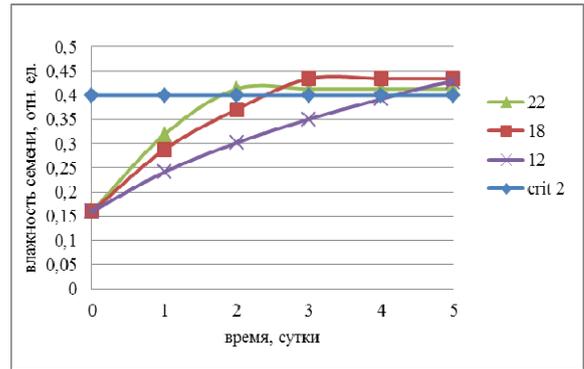


Рис. 2 - Влияние температуры почвы на накопление влаги семенем при условии влажности почвы близкой к оптимальной 7 мм.

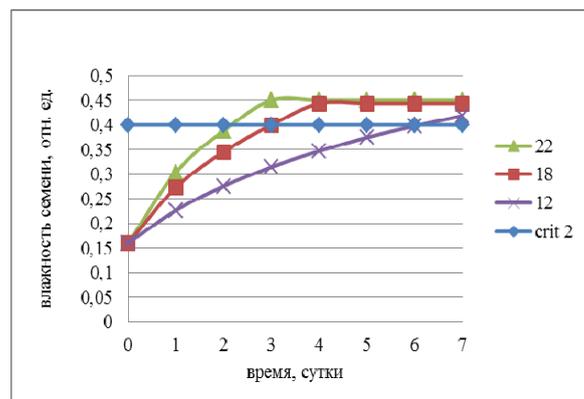


Рис. 3 - Влияние температуры почвы на накопление влаги семенем при условии пониженной влажности почвы 5 мм.

Вторая часть эксперимента рассматривает влияние температуры, влажности и плотности почвы на скорость удлинения coleoptily и появление всходов как следствие процессов прорастания семян.

При условии оптимального увлажнения и оптимальной температуры, лимитирующим фактором при образовании всходов является плотность почвы, а именно: с увеличением плотности почвы увеличивается и время появления всходов. Так, если при минимальном значении плотности 0,8 г/см³ coleoptиль может достигнуть поверхности почвы уже на 5-е сутки после посева, то при плотности в 1,4 г/см³ всходы появятся только через 7 суток (рис. 4).

Следует отметить, что даже при сохранении оптимального увлажнения, с понижением температуры почвы интенсивность прорастания семян также уменьшается. Поэтому при температуре 18 °С всходы появятся через 7–10 суток, а при 12 °С – минимум за 16 суток после посева.

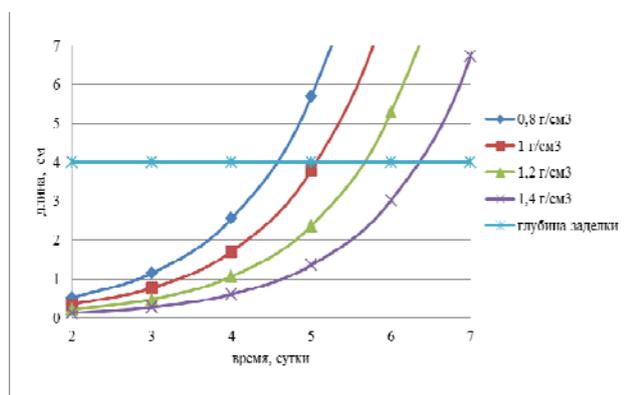


Рис. 4 - Влияние плотности почвы на время появления всходов при условии оптимальной температуры 22 °С и влажности почвы 7 мм.

Несмотря на то, что влажность почвы является одним из основных факторов влияния на скорость прорастания семян, с увеличением влажности до 9 мм время появления всходов практически не изменяется при оптимальной температуре 22 °С и также составляет 5 – 7 суток после посева и 7 – 10 суток при температуре 18 °С. При понижении температуры до 12 °С появление всходов можно ожидать лишь на 15-е сутки. Однако, с уменьшением влажности до 5 мм колеоптиль достигнет высоты слоя глубины заделки семян не ранее 6 суток в условиях оптимальной температуры и наименьшей плотности почвы. При температуре 18 °С это произойдет через 9 – 11 суток, а при температуре 12 °С – через 19 суток.

Кроме того, в условиях недостаточного увлажнения и температуры почвы, близкой к биологическому минимуму культуры, с увеличением плотности почвы возникает угроза гибели растения так и не достигшего поверхности почвы (рис. 5). В этом случае запасы эндосперма будут полностью исчерпаны на рост, росток не успеет выйти на дневную поверхность почвы и в связи с этим не произойдет переключения процесса питания ростка из гетеротрофного на автотрофное для поддержания дальнейшего роста.

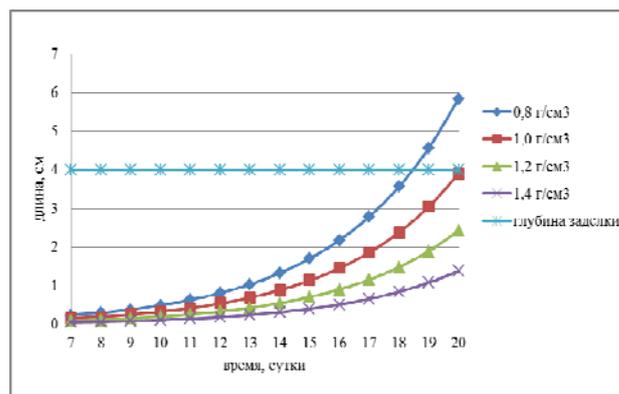


Рис. 5 - Влияние плотности почвы на время появления всходов при условии температуры 12 °С и пониженной влажности почвы 5 мм.

4. ВЫВОДЫ

Разработана динамическая модель формирования всходов зерновых культур, которая позволяет определить дату появления всходов, полевую всхожесть, распределение количества растений с различной глубиной заделки семян и количество растений на единицу площади. Модель описывает динамику поглощения влаги семенами и физиолого-биохимических процессов: гидролиза запасов эндосперма, дыхания, распределения продуктов гидролиза между осевыми органами и их рост.

В численных экспериментах установлено, что в формировании всходов влияние увлажнения почвы наиболее сильно проявляется на этапе поглощения и накопления влаги семенем от посева до запуска ростовых процессов. Установлена высокая чувствительность скорости удлинения колеоптиля к температуре почвы, а также к плотности почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Антоненко В.С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы / В.С.Антоненко. – К.: «АртЭк», 2002. – 64 с.
2. Дмитренко В.П. Влияние температуры воздуха на продолжительность периода посев – всходы зерновых культур. / В.П. Дмитренко // Труды УкрНИГМИ. - 1961. - Вып. 22. – 618 с.
3. Оптимизация условий возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии/ [Ковтун И.И., Гойса Н.И., Митрофанов Б.А.]; под ред. И.И. Ковтуна. - Ленинград: Гидрометиздат, 1990. - 288 с.
4. Немченко О.А. Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах органогенеза / О.А. Немченко, Л.И. Мусатенко // Физиология и биохимия культурных растений. - 1982. - Т. 14, № 5,

- С. 439–445.
5. Носатовский А.И. Пшеница / А.И. Носатовский. - М.: Государственное издательство сельхозлитературы, 1950. - 408 с.
 6. Павлова В.Н. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай» / В.Н. Павлова // Труды ВНИИСХМ. - 1983. - Вып. 8. - С. 28–36.
 7. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. / [Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г.]; за ред. Р.А. Полуэктова; изд-во С.-Петербургского ун-та. - С.-П., 2006. - 396 с.
 8. Польовий А.М. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур / А.М. Польовий // Український гідрометеорологічний журнал. - 2008. - № 3. С. 75–84.
 9. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистемы / О.Д. Сиротенко. - Л.: Гидрометиздат, 1981. - 167 с.
 10. Динамическая модель расходования запасов эндосперма семян зерновых культур в процессе прорастания и в период до появления всходов / [Строганова М.А., Коровин А.И., Полевой А.Н.]; за ред. М.А. Строгановой // Сельскохозяйственная биология. - 1983. - № 1. - С. 126–135.
 11. Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы / Ю.И. Чирков. - Л.: Гидрометиздат, 1969. - 251 с.
 12. Aggarwal P.K. et al. 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. *Agricultural Systems*, 2006, no 89, pp. 1–25.
 13. Ben Nouna B. et al. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modelling of leaf area and water stress functions. *Europ. J. Agronomy*, 2000, no 13, pp. 309–322.
 14. Carberry P.S., Muchow R.C., McCown R.L. Testing the CERES-Maize Simulation Model in a Semi-Arid Tropical Environment. *Field Crops Research*, 1989, no 20, pp. 297–315.
 15. David M. Alm et al. An Index Model for Predicting Seed Germination and Emergence. *Weed Technology*, 1993, vol. 7, no. 3, pp. 560–569.
 16. Forcella F. et al. Modeling seedling emergence. *Field Crops Research*, 2000, no. 67, pp. 123–139.
 17. Jame Y.W., Cutforth H.W. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, no 124, pp. 207–218.
 18. Palosuo T. et al. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Europ. J. Agronomy*, 2011, no 35, pp. 103–114.
 - the period sowing – germination of grain crops]. *Trudy UkrNIGMI – Proc. UkrSRHMI*, 1961, vol. 22, pp. 618.
 3. Kovtun I.I., Goya N.E., Mitrophanov A.B. *Optimizatsiya usloviy vozdeleyvaniya ozimoy pshenitsy po intensivnoy tekhnologii* [Optimization of the conditions of winter wheat cultivation on intensive technologies]. Leningrad: Gidrometizdat, 1990. 288 p. (Ed.: Kovtun I.I.).
 4. Nemchenko O.A., Musatenko L.I. Modelirovanie rosta i metabolizma rasteniy na rannikh etapakh organogeneza [Modeling growth and metabolism of plants at early stages of organogenesis]. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rasteniy. - Physiology and biochemistry of cultivated plants*, 1982, pp. 439–445.
 5. Nosatowski A.I. *Pshenitsa* [Wheat]. Moscow: State publishing house of agricultural literature, 1950. p. 408.
 6. Pavlova V.N. Modelirovanie rostovykh processov v period prorstaniya zerna v ramkakh modeley «pogoda – urozhay» [Modeling of growth processes during the germination of grain in the framework of models "weather – yield"]. *Trudy VNIISHM – Proc. ARRIAM*, 1983, vol. 8, pp. 28–36.
 7. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topaj A.G. *Modelirovanie produktsionnogo protsesssa sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Modeling of production process of agricultural crops] Saint-Petersburg: Publisher Saint-Petersburg University, 2006. p. 396. (Ed.: Poluektov R.A.).
 8. Polevoy A.M. Dinamichna model' prorstannya nasynnya ta formuvannya skhodiv zernovykh kultur [A dynamic model of spending reserves in the endosperm of cereal seeds during germination]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal. – Ukrainian hydrometeorological journal*, 2008, no. 3, pp. 75–84.
 9. Sirotenko O. D. *Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem*. [Mathematical modeling of water and heat regime and productivity of agroecosystems]. Leningrad: Gidrometizdat, 1981. p 167.
 10. Stroganova M.A., Korovin A.I., Polevoy A.M. Dinamicheskaya model' raskhodovaniya zapasov endosperma semyan zernovykh kul'tur v protsesse prorstaniya i v period do poyavleniya vskhodov [A dynamic model of spending reserves in the endosperm of cereal seeds during germination and in the period until germination]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya – Agricultural biology*, 1983, pp. 126–135.
 11. Chirkov Y.I. *Agrometeorologicheskie usloviya i produktivnost' kukuruzy* [Agrometeorological conditions and productivity of corn]. Leningrad: Gidrometizdat, 1969. p. 251.
 12. Aggarwal P.K. et al. 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. *Agricultural Systems*, 2006, no 89, pp. 1–25.
 13. Ben Nouna B. et al. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modelling of leaf area and water stress functions. *Europ. J. Agronomy*, 2000, no 13, pp. 309–322.
 14. Carberry P.S., Muchow R.C., McCown R.L. Testing the CERES-Maize Simulation Model in a Semi-Arid Tropical Environment. *Field Crops Research*, 1989, no 20, pp. 297–315.
 15. David M. Alm et al. An Index Model for Predicting Seed Germination and Emergence. *Weed Technology*, 1993, vol. 7, no. 3, pp. 560–569.

REFERENCES

1. Antonenko V.S. *Dinamicheskoe modelirovanie rosta, razvitiya i formirovaniya produktivnosti ozimoy pshenitsy* [Dynamic simulation of growth, development and formation of productivity of winter wheat]. Kiev: "Artek", 2002. 64 p.
2. DMITRENKO V.P. Vliyanie temperatury vozdukh na prodolzhitel'nost' perioda posev – vskhody zernovykh kultur [The effect of air temperature on the duration of

16. Forcella F. et al. Modeling seedling emergence. *Field Crops Research*, 2000, no. 67, pp. 123–139.
17. Jame Y.W., Cutforth H.W. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, no 124, pp. 207–218.
18. Palosuo T. et al. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Europ. J. Agronomy*, 2011, no 35, pp. 103–114.

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Польовий А.М.¹⁾, д. геогр. н., професор,
Сініцина В.В.²⁾

¹⁾Одеський державний екологічний університет
вул. Львівська, б. 15, 65016, Одеса, Україна, apolevoy@te.net.ua,
²⁾victoria.sinitsyna@gmail.com

Розглядається процес проростання насіння і формування сходів зернових культур, обумовлених чинниками довкілля. Розглядаються існуючі підходи до моделювання цього періоду, моделювання процесів, що відбуваються в насінні при проростанні, формування сходів, описана структура розробленої моделі періоду посів – сходи, а також результати проведених чисельних експериментів.

Представлена модель націлена на усунення недоліків і удосконалення попередніх моделей періоду від посіву до появи сходів. Розробка справжньої моделі виконана з урахуванням досягнутого рівня моделювання формування сходів з внесенням певних модифікацій. Модель враховує як фізичні процеси, що відбуваються в насінні до появи сходів, так і фізіолого-біохімічні процеси, такі як: гідроліз запасів ендосперму, дихання, розподіл продуктів гідролізу між осьовими органами та їх ріст.

Модель реалізована на ПК за допомогою програми Microsoft Office Excel. Проведено ряд чисельних експериментів по дослідженню чутливості моделі до зміни параметрів довкілля під час проростання насіння. Встановлено, що основними агрометеорологічними чинниками, які впливають на час появи і повноту сходів, є температура, вологість та щільність ґрунту. Вплив зволоження ґрунту найсильніше проявляється на етапі поглинання і накопичення вологи насінням від посіву до запуску ростових процесів. За умови оптимального зволоження і оптимальної температури, лімітуючим чинником при утворенні сходів є щільність ґрунту, а саме: зі збільшенням щільності ґрунту збільшується і час появи сходів.

Розроблена динамічна модель дозволяє визначити дату появи сходів, польову схожість, розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння і кількість рослин на одиницю площі.

Ключові слова: насіння, сходи, ендосперм, зародок, проросток, колеоптиль, гідроліз, дихання, білок, вуглеводи, щільність ґрунту.

MODELLING OF GRAINS' SHOOTS FORMATION

A.N. Polevoy¹⁾, Dr Sci. (Geogr.), Prof.
V.V. Sinitsyna²⁾

¹⁾ Odessa State Environmental University,
15 Lvivska Str., 65016, Odessa, Ukraine, apolevoy@te.net.ua
²⁾ victoria.sinitsyna@gmail.com

The processes of seed germination and shoots formation of crops caused by environmental factors are investigated. Also existing approaches to the modelling of this period, modelling of

processes taking place in a seed during its germination, shoots formation are investigated, the structure of the developed model of the period of sowing – rise of shoots is described, as well as the results of numerical experiments.

The specified model is aimed at overcoming the disadvantages and improving previous models of the period of sowing – rise of shoots. Development of this model is based on the achieved level of modelling of shoots formation with introduction of certain modifications. The model takes into account both physical processes taking place in a seed prior to germination of shoots and physiological and biochemical processes such as hydrolysis of endosperm reserves, respiration, distribution of hydrolysis products within axial organs and their growth.

The model is implemented on a PC using Microsoft Office Excel. Many numerical experiments were carried out in order to investigate sensitivity of the model to changes of environmental conditions during germination of seeds. It was found that main agrometeorological factors affecting the time of emergence and completeness of germination are temperature, humidity and soil density. Influence of soil moisture becomes the most apparent at the stage of absorption and accumulation of moisture by a seed starting from sowing to beginning of growth process. Provided that there are optimum moisture and temperature, density of soil appears to be limiting factor affecting shoots formation: if soil density increases duration of shoots emergence increases as well.

Developed dynamic model allows determining the date of shoots emergence, their field germination rate, distribution of particular number of plants of with different depth of seeds covering and a number of plants per particular unit of area.

Key words: seed, shoots, endosperm, germ, seedling, coleoptile, hydrolysis, respiration, protein, carbohydrates, soil density.

Дата першого подання: **12.05.2016**

Дата надходження остаточної версії: **10.06.2016**

Дата публікації статті: **04.07.2016**