

## **МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ**

*Предлагается модель формирования агроэкологических категорий урожайности ярового ячменя в разрезе почвенно-климатических зон Украины, в которую входит отдельный блок стеблеобразования. Определены параметры модели и выполнена проверка ее адекватности.*

**Ключевые слова:** климатические зоны, модель, урожайность, стеблеобразование, яровой ячмень.

**Введение.** В настоящее время разработано уже довольно много длиннопериодных динамических моделей различных сельскохозяйственных культур, позволяющих оценить рост растения в течение вегетационного периода как результирующую основных физиологических процессов. При построении многих длиннопериодных динамических моделей используется методология, разработанная Россом [1, 2], Тоомингом [4, 5], Торнли [6], а также сформулированные этими авторами принципы моделирования ряда физиологических процессов.

Повышение продуктивности сельскохозяйственных культур неразрывно связано с проблемой оценки агроклиматических ресурсов территории и рациональным размещением посевов. Только максимальное совпадение биологических требований сельскохозяйственных культур и агроклиматических условий может привести к получению высоких и устойчивых урожаев. Изменение условий климата неизбежно влечет за собой изменение продуктивности сельскохозяйственных культур и необходимость новой оценки возможности их размещения, возделывания и рационального использования изменившихся агроклиматических ресурсов.

**Материалы и методы исследования.** Целью являлось изучение влияния агрометеорологических условий на темпы развития формирования стеблестоя и продуктивности ярового ячменя, оценка агроклиматических ресурсов Украины применительно к возделыванию этой культуры.

Работа выполнялась на основании комплексного подхода с использованием экспериментально-полевого метода исследований, корреляционного и регрессионного анализов, методов анализа временных рядов, аппарата математического моделирования продукционного процесса растений.

В качестве исходной информации использовались данные наблюдений на сети гидрометеорологических и агрометеорологических станций Украинской Гидрометслужбы; сведения из "Справочника по климату СССР" и "Довідника з агрокліматичних ресурсів України. Серія 2. Частина 2"; материалы статистических управлений по урожайности ярового ячменя за период 1966 – 1999 гг.; данные государственных сортоиспытательных участков.

В поисках путей оценки агроклиматических ресурсов конкретных культур многие исследователи пришли к выводу, что лучшим интегральным показателем степени благоприятности почвенно-климатических условий территории применительно к этим культурам является их продуктивность.

**Результаты исследований и их анализ.** В предлагаемом нами варианте агроклиматической модели продуктивности сельскохозяйственных культур использована концепция Х. Г. Тооминга о потенциальной и действительно возможной урожайности, а также сформулированные в работах А.Н. Полевого [7] положения о

моделировании влияния факторов внешней среды на урожайность сельскохозяйственных культур. Потенциальная урожайность (ПУ) представляет собой урожайность, которая обеспечивается приходом энергии фотосинтетически активной радиации (ФАР) при оптимальных в течение вегетационного периода растения значениях климатических факторов, а метеорологически возможная урожайность (МВУ) – урожайность, определяемая потенциальной урожайностью и лимитирующим действием режима климатических факторов в течение вегетации. При формировании действительно возможной урожайности (ДВУ) ее уровень ограничивается уровнем естественного плодородия почвы. Получение уровня хозяйственной урожайности (УП) лимитируется уровнем культуры земледелия.

Расчет этих четырех характеристик в несколько модифицированном виде, а также стеблеобразования в течение периода вегетации составляет основу варианта предлагаемой нами модели, ориентированной на оценку продуктивности агроклиматических ресурсов применительно к возделыванию ярового ячменя, а также на оценку изменения продуктивности растений при возможных изменениях климата.

Структура модели и описание блоков модели приведено в работе [8]. Остановимся на описании блока расчета агроэкологических категорий урожайности.

В основе модели лежит оценка уровня потенциальной урожайности:

$$ПУ^{j+1} = ПУ^j + \frac{\Delta ПУ^j}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $\frac{\Delta ПУ^j}{\Delta t}$  – прирост потенциальной урожайности за декаду, г/м<sup>2</sup> · дек;  $j$  – номер расчетной декады.

Приращение потенциальной урожайности за декаду определяется в зависимости от интенсивности ФАР и биологических особенностей культуры с учетом изменения способности растений к фотосинтезу в течение вегетации:

$$\frac{\Delta ПУ^j}{\Delta t} = \alpha_\phi^j \frac{\eta \cdot Q_{\text{фар}}^j \cdot d\nu^j}{q}, \quad (2)$$

где  $\alpha_\phi$  – онтогенетическая кривая фотосинтеза;  $\eta$  – КПД посевов, отн.ед.;  $Q_{\text{фар}}$  – сумма ФАР за один день расчетной декады, кДж/см<sup>2</sup> · сут.;  $d\nu$  – число дней в расчетной декаде, сут.;  $q$  – калорийность, кДж/г.

Опишем динамику стеблестоя ярового ячменя в период от фазы 3-го листа до восковой спелости. При этом динамика общего количества стеблей будет определяться начальным количеством стеблей, максимально возможным увеличением количества стеблей при кущении и естественной редукцией их в период после колошения:

$$СтПУ^{j+1} = СтПУ^j + \frac{\Delta СтПУ^j}{\Delta t} - \frac{\Delta РСтПУ^j}{\Delta t}, \quad (3)$$

где СтПУ – количество стеблей на уровне ПУ, стебл./м<sup>2</sup>;  $\frac{\Delta \text{СтПУ}}{\Delta t}$  – приращение стеблей на уровне ПУ, стебл./м<sup>2</sup> · дек.;  $\frac{\Delta P \text{СтПУ}}{\Delta t}$  – интенсивность естественной редукции стеблей, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

Скорость кушения определяется как произведение максимально возможной скорости кушения и относительной скорости увеличения количества стеблей:

$$\frac{\Delta \text{СтПУ}}{\Delta t} = \frac{\Delta \text{СтПУ}_{\max}}{\Delta t} \cdot \beta_{\text{ст}}^j, \quad (4)$$

где  $\Delta \text{СтПУ}_{\max}$  – максимально возможное приращение количества стеблей, определяемое потенциальными возможностями культуры, стебл./м<sup>2</sup> · дек.;  $\beta_{\text{ст}}^j$  – относительная скорость кушения (отн.ед.), описываемая нами как первая производная логистической кривой:

$$\beta_{\text{ст}}^j = \frac{2,3 \cdot \left( \frac{2}{0,5 \cdot \sum t_{\text{ст}1}} \right) \cdot 10^{\left( 2 - \left( \frac{2}{0,5 \cdot \sum t_{\text{ст}1}} \right) \right)}}{1 + 10^{\left( 2 - \left( \frac{2}{0,5 \cdot \sum t_{\text{ст}1}} \right) \right) \cdot TS_2}}, \quad (5)$$

где  $\sum t_{\text{ст}1}$  – критическая сумма температуры воздуха для процесса кушения.

Естественная редукция стеблей определяется как произведение максимально возможной редукции стеблей и относительной скорости редукции:

$$\frac{\Delta P \text{СтПУ}^j}{\Delta t} = \beta_{\text{ред}}^j \cdot \frac{\Delta P \text{СтПУ}_{\max}}{\Delta t}, \quad (6)$$

где  $\beta_{\text{ред}}^j$  – относительная скорость редукции стеблестоя, отн.ед.;  $\frac{\Delta P \text{СтПУ}_{\max}}{\Delta t}$  – максимально возможная редукция стеблей, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

На формирование стеблестоя значительное влияние оказывает влаготемпературный режим. Приращение стеблестоя на уровне МВУ будет представлять собой приращение стеблестоя на уровне ПУ с учетом влияния ограничивающих кушение факторов термического режима и влагообеспеченности:

$$\frac{\Delta \text{СтМВУ}^j}{\Delta t} = \frac{\Delta \text{СтПУ}^j}{\Delta t} \cdot (FT_{\text{ст}}^j \cdot FW_{\text{ст}}^j)^{0,5}, \quad (7)$$

где  $\Delta \text{СтМВУ}$  – скорость увеличения количества стеблей с учетом влияния температуры воздуха и условий влагообеспеченности, стебл./м<sup>2</sup> · дек.;  $FT_{\text{ст}}$  – функция влияния температуры воздуха на процесс кушения, отн.ед.;  $FW_{\text{ст}}$  – функция влияния влагообеспеченности на процесс кушения, отн.ед.

Динамика стеблестоя на уровне МВУ описывается уравнением:

$$C_{\text{ТМВУ}}^{j+1} = C_{\text{ТМВУ}}^j + \frac{\Delta C_{\text{ТМВУ}}^j}{\Delta t} - \frac{\Delta PC_{\text{ТМВУ}}^j}{\Delta t}, \quad (8)$$

где  $C_{\text{ТМВУ}}$  – количество стеблей на единицу площади на уровне МВУ, стебл./м<sup>2</sup> · дек.;  $\frac{\Delta PC_{\text{ТМВУ}}}{\Delta t}$  – скорость деградации стеблей за счет воздействия неблагоприятных погодных условий, стебл./м<sup>2</sup> · дек., которая находится по выражению:

$$\frac{\Delta PC_{\text{ТМВУ}}^j}{\Delta t} = \frac{\Delta PC_{\text{ТПУ}}^{\text{max}}}{\Delta t} \cdot (FT_{\text{ред}}^j \cdot FW_{\text{ред}}^j)^{0,5}, \quad (9)$$

где  $\Delta PC_{\text{ТПУ}}^{\text{max}}$  – максимально возможная редукция стеблей, стебл./м<sup>2</sup> · дек.;  $FT_{\text{ред}}, FW_{\text{ред}}$  – функции влияния соответственно температуры воздуха и влажности почвы на редукцию стеблестоя, отн.ед.

Формирование действительно возможной урожайности ограничивается уровнем естественного плодородия почвы:

$$\frac{\Delta ДВУ^j}{\Delta t} = \frac{\Delta МВУ^j}{\Delta t} \cdot B_{\text{пл}}, \quad (10)$$

где  $\frac{\Delta ДВУ^j}{\Delta t}$  – прирост действительно возможной урожайности, г/м<sup>2</sup> · дек.;  $B_{\text{пл}}$  – балл почвенного бонитета, отн.ед.

Приращение стеблей на уровне ДВУ рассматривается как приращение стеблей на уровне МВУ с учетом влияния балла почвенного плодородия.

$$\frac{\Delta C_{\text{ТДВУ}}^j}{\Delta t} = \frac{\Delta C_{\text{ТМВУ}}^j}{\Delta t} \cdot (B_{\text{пл}})^{0,5}, \quad (11)$$

где  $\Delta C_{\text{ТДВУ}}$  – приращение стеблей на уровне ДВУ, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

Редукция стеблей усиливается за счет уровня плодородия почвы:

$$\frac{\Delta PC_{\text{ТДВУ}}^j}{\Delta t} = \frac{\Delta PC_{\text{ТМВУ}}^j}{\Delta t} \cdot (1/B_{\text{пл}})^{0,5}, \quad (12)$$

где  $\frac{\Delta PC_{\text{ТДВУ}}}{\Delta t}$  – интенсивность естественной редукции стеблей, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

На уровне ДВУ формирование стеблестоя может быть описано уравнением:

$$C_{\text{ТДВУ}}^{j+1} = C_{\text{ТДВУ}}^j + \frac{\Delta C_{\text{ТДВУ}}^j}{\Delta t} - \frac{\Delta PC_{\text{ТДВУ}}^j}{\Delta t}, \quad (13)$$

где  $C_{\text{ТДВУ}}$  – количество стеблей на уровне ДВУ, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

Получение уровня хозяйственной урожайности ограничивается реально существующим уровнем культуры земледелия и эффективностью внесенных минеральных и органических удобрений:

$$\frac{\Delta УП^j}{\Delta t} = \frac{\Delta ДВУ^j}{\Delta t} \cdot k_{земл} \cdot FW_{ef}^j, \quad (14)$$

где  $\frac{\Delta УП^j}{\Delta t}$  – прирост урожайности в производстве, г/м<sup>2</sup> · дек.;  $k_{земл}$  – коэффициент, который характеризует уровень культуры земледелия и хозяйственной деятельности, отн. ед.;  $FW_{ef}$  – функция эффективности внесения органических и минеральных удобрений в зависимости от условий влагообеспеченности декад вегетации, отн. ед.

Эта функция находится как произведение функции влияния влажности почвы на эффективность внесения удобрений и функции обеспеченности посевов органическими и минеральными удобрениями.

В условиях УП приращение количества стеблей будет ограничиваться уровнем культуры земледелия и эффективностью внесенных удобрений:

$$\frac{\Delta СтУП^j}{\Delta t} = \frac{\Delta СтДВУ^j}{\Delta t} \cdot (k_{земл} \cdot FW_{ef}^j)^{0,5}, \quad (15)$$

где  $\frac{\Delta СтУП^j}{\Delta t}$  – приращение количества стеблей на уровне УП, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

Деградация стеблей зависит от уровня культуры земледелия и усиливается при низкой эффективности внесения удобрений:

$$\frac{\Delta PCтУП^j}{\Delta t} = \frac{\Delta PCтДВУ^j}{\Delta t} \cdot [1/(k_{земл} \cdot FW_{ef}^j)]^{0,5}, \quad (16)$$

где  $\Delta PCтУП$  – скорость деградации стеблей за счет воздействия неблагоприятных погодных условий, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

Таким образом, динамика стеблестоя на уровне УП опишется уравнением:

$$СтУП^{j+1} = СтУП^j + \Delta СтУП^j - \Delta PCтУП^j, \quad (17)$$

где  $СтУП$  – количество стеблей на уровне УП, стебл./м<sup>2</sup> · дек.

Кустиность на уровне ПУ, МВУ, ДВУ, УП рассчитывается как отношение числа стеблей к их числу на начало расчета.

Важным показателем продуктивности посевов сельскохозяйственных культур является коэффициент хозяйственной эффективности урожая  $K_{хоз}$ , выражающий отношение количества сухой фитомассы хозяйственной части урожая (зерно, клубни, початки, плоды и т.д.) к массе общей сухой фитомассы. Коэффициент хозяйственной эффективности зависит от сорта сельскохозяйственных культур и агрометеорологических условий.

С учетом этого показателя вычисляются различные агроэкологические категории урожая зерна при его стандартной влажности:

$$ПУ_{зерна} = ПУ \cdot K_{хоз} \cdot 1.14 \cdot 0.1, \quad (18)$$

$$МВУ_{зерна} = МВУ \cdot K_{хоз} \cdot 1.14 \cdot 0.1, \quad (19)$$

$$ДВУ_{зерна} = ДВУ \cdot K_{хоз} \cdot 1.14 \cdot 0.1, \quad (20)$$

$$УП_{зерна} = УП \cdot K_{хоз} \cdot 1.14 \cdot 0.1, \quad (21)$$

где  $ПУ_{зерна}$ ,  $МВУ_{зерна}$ ,  $ДВУ_{зерна}$ ,  $УП_{зерна}$  – агроэкологические категории урожая зерна, ц/га.

Как уже указывалось  $K_{хоз}$ , зависит от вида сорта сельскохозяйственных культур и от агрометеорологических условий.

Например,  $K_{хоз}$  озимой пшеницы в условиях Полтавской области варьируется от 13 до 53%. Из причин, снижающих  $K_{хоз}$ , прежде всего следует отметить засуху и полегание растений. При высокой общей продуктивности фотосинтеза и высоком приросте общей сухой фитомассы снижение  $K_{хоз}$  обусловлено ухудшением условий ФАР внутри посева при интенсивном вегетативном росте растений, высокорослостью растений и недостаточной обеспеченностью растений питательными веществами при высокой влажности почвы [4].

Минеральные элементы при дробном и дифференцированном применении повышают  $K_{хоз}$  и качество урожая [3]. Совместное внесение азота и фосфора, усиленное фосфорное питание, а также бор и марганец способствуют повышению  $K_{хоз}$ , тогда как усиленное азотное питание и медь снижают  $K_{хоз}$  отдельных культур. Анализ [4] полученных уникальных данных опытов с озимой рожью и пшеницей на Полтавской опытной станции в течение 71 года позволяет сделать некоторые достаточно общие выводы, касающиеся и других сельскохозяйственных культур:

1. В ходе селекции урожай как общей сухой фитомассы, так и зерна постепенно повышается, при этом отмечается тенденция роста  $K_{хоз}$ ;
2. Показатель  $K_{хоз}$  снижается при очень низком и при достаточно высоком накоплении фитомассы, однако, при некотором среднем значении фитомассы он достигает наибольшей величины.

Таким образом, высокий уровень накопления общей фитомассы является, с одной стороны, базой для создания высокого урожая зерна, с другой – часто ведет к снижению коэффициента хозяйственной эффективности посевов  $K_{хоз}$ . Следовательно, уровень хозяйственно ценной части урожая не всегда пропорционален значению КПД, рассчитанному по общей сухой фитомассе. Поэтому наряду с КПД посева  $\eta$ , рассчитанным по общей сухой фитомассе, иногда можно рассматривать отдельно КПД хозяйственно ценной части урожая за вегетационный период [4]:

$$\eta_{хоз} = \frac{qm_{хоз}}{\sum Q_{фар}}, \quad (22)$$

где  $m_{хоз}$  – сухая фитомасса хозяйственно ценной части урожая, г/см<sup>2</sup>;  $q$  – калорийность урожая, кДж/г;  $\sum Q_{фар}$  – сумма ФАР за вегетационный период, кДж/см<sup>2</sup>.

Таким образом,  $\eta_{хоз}$  – это доля ФАР, запасенная в течение вегетационного периода в фитомассе хозяйственно ценных органов растений. КПД, рассчитанный по общей сухой фитомассе, и  $\eta_{хоз}$  связаны соотношением:

$$\eta_{хоз} = \eta K_{хоз}. \quad (23)$$

Следовательно, чтобы обеспечить высокие значения КПД хозяйственно ценной части урожая, получения новых сортов и все агротехнические приемы должны быть направлены на обеспечение высокого показателя  $K_{хоз}$  при высоком значении КПД общей фитомассы посева.

**Выводы.** Формулы (1 – 23) позволяют определить различные агроэкологические категории урожайности ярового ячменя в условиях Украины и выделить четыре типа агрометеорологических условий, определяющих динамику кустистости и густоту продуктивного стеблестоя.

### Список литературы

1. Росс Ю. К. Система уравнений для количественного роста растений //В кн.: Фитоактинометрические исследования растительного покрова. – Таллин: Валгус, 1967. – С.64–88.
2. Росс Ю.К. К математическому описанию роста растений. – ДАН АН СССР, 1966, 171, № 2. – С. 481 – 483.
3. Берлянд Т.Г. Распределение солнечной радиации на континентах. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 227 с.
4. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 200 с.
5. Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 264 с.
6. Thornley J. H.M. Mathematical models in plant physiology. A quantitative approach to problems in plant and crop physiology. – London; New York: Acad. Press, 1976, p. 318.
7. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 175 с.
8. Барсукова Е.А. Агроклиматические ресурсы продуктивности ярового ячменя //Дис. на соискание ученой степени к.г.н. – Одесса. 2004. – 285 с.

#### **Модель формування продуктивності ярого ячменю. Барсукова О.А.**

*Пропонується модель формування агроекологічних категорій урожайності ярого ячменю у розрізі ґрунтово-кліматичних зон України, в яку входить окремий блок стебло утворення. Визначені параметри моделі і виконана перевірка її адекватності.*

**Ключевые слова:** кліматичні зони, модель, урожайність, стеблоутворення, ярий ячмінь.

#### **A model of spring barley productivity formation. Barsukova E.A.**

*A model for shaping up agroecological categories of spring barley productivity in the context of soil-climatic zones of the Ukraine with an accompanying separate block of stem formation is suggested. Parameters of the model are defined and verification of its adequacy is performed.*

**Keywords:** climatic zones, model, productivity, stem formation, spring barley.