

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДА ОСЕННЕЙ ВЕГЕТАЦИИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Моделируется влияние факторов среды на процессы фотосинтеза, дыхания, роста, кущения озимой пшеницы. Рассматривается рост главного и боковых побегов кущения.

Ключевые слова: фотосинтез, дыхание, солнечная радиация, температура, влажность почвы, рост, узел кущения, корни, побеги.

Онтогенез 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. Одним из таких этапов является период осенней вегетации озимой пшеницы. Сделаны попытки создания математических моделей периода осенней вегетации [1, 3, 5].

Целью нашего исследования является моделирование процесса роста и развития растений озимой пшеницы в осенний период.

Результаты исследования. После появления всходов (развертывания над поверхностью почвы первого листа, выросшего из первого зародышевого листа) завершается переход молодого проростка на самостоятельное корневое и внекорневое питание.

Для расчета интенсивности фотосинтеза листьев воспользуемся формулой, предложенной в работе [9]. Введем в эту формулу дополнительно функции, отражающие влияние на интенсивность фотосинтеза обеспеченность растений азотом, а также учитывающие воздействие влаготемпературного режима на скорость процесса фотосинтеза

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

где $\frac{d\Phi}{dt}$ – интенсивность фотосинтеза листьев;

τ_c – коэффициент потенциальной проводимости CO₂;

C_a – концентрация CO₂ в атмосфере;

k_N – коэффициент обеспеченности растений азотом;

k_{PII} – коэффициент ослабления радиации растительным покровом;

I_0 – интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) над посевом;

α – наклон световой кривой фотосинтеза;

k_L – коэффициент пропускания ФАР листьями;

L – относительная площадь листовой поверхности посева;

k_{WT} – обобщенная функция влияния влагообеспеченности посевов и температуры воздуха на фотосинтез.

Остановимся несколько подробнее на определении обобщенной функции k_{WT} . Она определяется как некая комбинация функций влияния влагообеспеченности посевов $k_{\Phi}(W)$ и влияния температурного режима воздуха на фотосинтез $k_{\Phi}(T_e)$. Исходя из принципа Либиха

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

К определяемому по такому принципу коэффициенту лимитирования вводится в соответствии с [6, 8] корректирующая поправка. Смысл ее заключается в том, что при одновременном воздействии высокой температуры и засухи или низкой температуры и избытка влаги влияние лимитирующих факторов на продуктивность растений усиливается, а при высокой температуре и избытке влаги или низкой температуре и засухе ослабляется. С учетом сочетаний таких влаготемпературных условий будет определяться лимитирующий фактор

$$\left. \begin{array}{l} k_{WT} \{1 - [1 - k_{\Phi}(T_{\epsilon})][1 - k_{\Phi}(W)]\} \\ \text{при } T_{\epsilon} < T_{\epsilon}^{opt} \text{ и } W > W_2^{opt} \text{ или } T_{\epsilon} > T_{\epsilon}^{opt} \text{ и } W < W_1^{opt} \\ k_{WT} \{1 + [1 - k_{\Phi}(T_{\epsilon})][1 - k_{\Phi}(W)]\} \\ \text{при } T_{\epsilon} < T_{\epsilon}^{opt} \text{ и } W < W_1^{opt} \text{ или } T_{\epsilon} > T_{\epsilon}^{opt} \text{ и } W > W_2^{opt} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где T_{ϵ}^{opt} – оптимальная для фотосинтеза температура воздуха;

W_1^{opt}, W_2^{opt} – оптимальные пределы влажности почвы.

Вслед за появлением первого зеленого листа появляются второй и третий зародышевые листья, при достаточном увлажнении продолжается рост первой и второй пары зародышевых корней, появляются колеоптильные корни – идет формирование первичной корневой системы. Вместе с ростом второго и третьего листа происходит быстрый рост третьего междоузлия в длину, который приостанавливается в верхнем очень тонком подповерхностном слое почвы, куда уже начинает проникать солнечная радиация. Третий зародышевый узел начинает резко увеличиваться в объеме и образует подземный узел кущения. Вначале узел кущения образуется на материнском (главном) побеге, затем развиваются боковые побеги 1-го порядка, и узел кущения главного побега пополняется за счет узлов кущения всех его боковых побегов 1-го порядка. Затем в результате кущения боковых побегов 1-го порядка появляются боковые побеги 2-го порядка со своими узлами кущения и так далее. С наступлением фазы кущения развиваются вторичные или узловые корни, растущие из узлов кущения сначала главного, а затем и боковых побегов.

Продолжительность периода всходы–образование узла кущения определяется температурным режимом и увлажнением почвы. По данным [10] минимальные величины запасов продуктивной влаги в почве в слое 0-20 см, при которой кущение практически отсутствует, составляют около 5-7 мм, оптимальные условия складываются при запасах более 40 мм. Результаты исследований влияния температуры [4] и условий увлажнения [10] на длительность рассматриваемого периода позволяют объединить описание воздействия этих факторов на продолжительность периода всходы – образование узла кущения

$$n_{всх.-у.к.} = \left[\left(\frac{176}{T_{\epsilon} - T_{\epsilon.(у.к.)}^{\min}} - 7,4 \right) \left(\frac{93,4}{W_{0-20}^{0,64}} \right) \right] n_{всх.-у.к.}^{\min}, \quad (4)$$

где $n_{всх.-у.к.}$ – продолжительность периода всходы – образование узла кущения;

$T_{e.(y.k.)}^{\min}$ – минимальная температура, при которой начинается закладка узла кушения;

$n_{всх.-y.k.}^{\min}$ – минимальная продолжительность периода всходы – образование узла кушения при оптимальной влажности почвы.

С этого момента происходит "включение" образования боковых побегов 1-го порядка, затем 2-го и последующих порядков.

Водный и воздушный режим почвы, уровень минерального питания значительно ограничивают скорость кушения. Для появления каждого очередного бокового побега требуется вполне определенная сумма эффективных температур и суммарной солнечной радиации. Образование боковых побегов кушения 1-го, 2-го и последующих порядков должно быть обеспечено резервом питательных веществ, остающихся сверх количества, необходимого для развития главного побега и боковых побегов первых порядков. Запишем уравнение скорости образования боковых побегов кушения в виде

$$\frac{dN_{\bar{o}.n.}}{dt} = \begin{cases} \left[\frac{2,3b_{\bar{o}.n.}(10^{a_{\bar{o}.n.}-b_{\bar{o}.n./T})N_{\bar{o}.n.}^{\max}k_{NPK}}{(1+10^{a_{\bar{o}.n.}-b_{\bar{o}.n./T})^2} \min\{k_{\bar{o}.n.}(Q), k_{\bar{o}.n.}(\Sigma T_{эф})\}} \right] & n_{пу} \quad W_{0-20} > W_{0-20}^{crit} \\ 0 & n_{пу} \quad W_{0-20} \leq W_{0-20}^{crit} \end{cases} \quad (5)$$

где $\frac{dN_{\bar{o}.n.}}{dt}$ – скорость образования боковых побегов кушения;

$N_{\bar{o}.n.}^{\max}$ – максимально возможное в данных условиях количество побегов кушения, обеспеченное питательными веществами;

k_{NPK} – коэффициент обеспеченности элементами минерального питания;

$k_{\bar{o}.n.}(Q)$ и $k_{\bar{o}.n.}(\Sigma T_{эф})$ – функции обеспеченности необходимого количества солнечной радиации и тепла;

W_{0-20}^{crit} – критическое содержание влаги в пахотном слое почвы, при котором кушение не происходит;

$a_{\bar{o}.n.}$ и $b_{\bar{o}.n.}$ – параметры.

Величина максимально возможного в данных условиях количества побегов, которое будет обеспечено ассимилятами, определяется как соотношение резерва питательных веществ к максимально возможному в данных условиях приросту биомассы боковых побегов

$$N_{\bar{o}.n.}^{\max} = \frac{dm_{\bar{o}.n.}^{pez} / dt}{G_{\bar{o}.n.}^{\max}}, \quad (6)$$

где $N_{\bar{o}.n.}^{\max}$ – максимально возможное в данных условиях количество побегов, потребности роста которых могут быть полностью удовлетворены;

$\frac{dm_{\bar{o}.n.}^{pez}}{dt}$ – резерв ассимилятов, остающийся после удовлетворения потребностей главного побега.

Он находится как разность между количеством ассимилятов, направленных в надземную часть растения, и количеством ассимилятов, поступивших в главный побег

$$\frac{dm_{\delta.n.}^{pez}}{dt} = \frac{dm_{надз}}{dt} - \frac{dm_{з.н.}}{dt}, \quad (7)$$

где $\frac{dm_{надз}}{dt}$ и $\frac{dm_{з.н.}}{dt}$ – прирост биомассы соответственно надземной части растения и главного побега;

$G_{\delta.n.}^{\max}$ – максимально возможный в данных условиях прирост биомассы боковых побегов, определяемый как

$$G_{\delta.n.}^{\max} = (m_{\delta.n.} G_{\delta.n.}^{pot}) \min \{k_{\delta.n.}(T_v), k_{\delta.n.}(W)\}, \quad (8)$$

где $m_{\delta.n.}$ – биомасса боковых побегов;

$G_{\delta.n.}^{pot}$ – потенциальный относительный прирост биомассы боковых побегов;

$k_{\delta.n.}(T_v)$ и $k_{\delta.n.}(W)$ – функции влияния соответственно температуры воздуха и увлажнения почвы на рост боковых побегов.

При описании динамики формирования надземной и подземной части растений нами использована концепция существования функционального равновесия между этими частями растений, впервые реализованная в работах [2, 11, 12, 15, 16] в виде блоков моделей, получивших название: модели типа "shoot: root". Соотношение этих частей определяется режимом увлажнения почвы и уровнем минерального питания

$$\gamma_{надз} = \gamma_{надз}^{pot} k_{надз}(W) k_{надз}(NPK), \quad (9)$$

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

$$\frac{dm_{надз}}{dt} = \left(\Phi - \frac{dR}{dt} \right) \gamma_{надз} \quad (10)$$

и

$$\frac{dm_{подз}}{dt} = \left(\Phi - \frac{dR}{dt} \right) (1 - \gamma_{надз}), \quad (11)$$

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

$\frac{dR}{dt}$ – дихання рослин, визначене як складене з двох компонентів [7, 13, 14] – дихання росту і дихання підтримки структур

$$\frac{dR}{dt} = D_M [c_m M Q_R(T_e) + c_G \Phi], \quad (12)$$

де D_M – параметр старіння рослин, що відображає зміну дихальної активності рослин в життєвому циклі;

c_m і c_G – коефіцієнти дихання відповідно підтримки і росту;

M – маса рослин.

Приріст надземної маси розподіляється пріоритетно спочатку в головний пагін, потім в бічні пагі 1-го, 2-го і наступних порядків:

$$\frac{dm_{z.n.}}{dt} = \gamma_{z.n.} \frac{dm_{надз}}{dt}; \quad (13)$$

$$\frac{dm_{1б.н.}}{dt} = \gamma_{б.н.} \left(\frac{dm_{надз}}{dt} - \frac{dm_{z.n.}}{dt} \right); \quad (14)$$

$$\frac{dm_{qб.н.}}{dt} = \gamma_{qб.н.} \left(\frac{dm_{надз}}{dt} - \frac{dm_{z.n.}}{dt} - \sum_i^{q-1} \frac{dm_{iб.н.}}{dt} \right), \quad (15)$$

де $\frac{dm_{1б.н.}}{dt}$, $\frac{dm_{iб.н.}}{dt}$, $\frac{dm_{qб.н.}}{dt}$ – приріст біомаси бічних пагів 1-го, i -го і q -го порядків;

$\gamma_{z.n.}$, $\gamma_{б.н.}$, $\gamma_{qб.н.}$ – функції розподілу асимілятів для головного і бічних пагів.

Динаміка площі асимілюючої поверхні описується рівнянням виду

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dm_{надз}}{dt} \frac{1}{\delta_m}, \quad (16)$$

де δ_m – удельна поверхнева густина листів.

Потік поживних речовин в підземну частину рослин спрямований на формування первинної і вторинної кореневої системи, а також вузла кущення:

$$\frac{dm_{r1}}{dt} = \gamma_{r1} \frac{dm_{подз}}{dt}; \quad (17)$$

$$\frac{dm_{r2}}{dt} = \gamma_{r2} \frac{dm_{подз}}{dt}; \quad (18)$$

$$\frac{dm_{y.k.}}{dt} = \gamma_{y.k.} \frac{dm_{подз}}{dt}, \quad (19)$$

где $\frac{dm_{r1}}{dt}$ и $\frac{dm_{r2}}{dt}$ – прирост массы соответственно первичной и вторичной корневой системы;

$\frac{dm_{y.k.}}{dt}$ – прирост массы узла кущения;

γ_1 , γ_2 , и $\gamma_{y.k.}$ – ростовые функции роста соответственно первичной и вторичной корневой системы, узла кущения.

Выводы. Таким образом, уравнения (1) – (19) описывают рост и развитие растений озимой пшеницы в осенний период вегетации. Рассматриваются процессы фотосинтеза и дыхания, определяемые интенсивностью ФАР и влаготемпературным режимом посевов. Предложено описание продолжительности периода всходы–образование узла кущения, которое определяется температурным режимом и увлажнением почвы. С этого момента происходит "включение" образования боковых побегов 1-го порядка, затем 2-го и последующих порядков.

Рассматривается, что образование боковых побегов кущения 1-го, 2-го и последующих порядков должно быть обеспечено резервом питательных веществ, остающихся сверх количества, необходимого для развития главного побега и боковых побегов первых порядков. Записаны уравнения скорости образования боковых побегов кущения, динамики формирования надземной и подземной массы растений озимой пшеницы.

Список литературы

1. Антоненко В.С. Агрометеорологический мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине с применением аэрокосмических методов. – Киев: "АртЭк", 2002. – 307 с.
2. Галямин Е.П. Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 272 с.
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. Ковтун И.И., Гойса Н.И., Митрофанов Б.А. Оптимизация условий возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.
5. Польовий А.М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем. – Київ: КНТ, 2007. – 344 с.
6. Сепп Ю.В. Динамическая модель формирования урожая картофеля //Динамическое моделирование в агрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 44–48.
7. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 200 с.
8. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 264 с.
9. Торнли Дж. Г.М. Математические модели в физиологии растений. – Киев: Наукова Думка, 1982. – 310 с.
10. Уланова Е.С. Методика оценки сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий развития и роста озимых в осенний период //Сборник методических указаний. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – С. 93–104.
11. Brouwer R., de Wit C.T. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences. //In.: Root Growth. – London: Butter worth, 1969. – 450 p.
12. Charles–Edwards D.A. The mathematics of photosynthesis and productivity. – London etc.: Acad. Press, 1981. – 127 p.

13. *Curry R.B.* Dynamic simulation of plant growth. I. Development of a model. //Trans. ASAE, 1971. – V. 14. – № 5. – P. 946–959.
14. *McCree K. J.* An equation for the rate of respiration white clover plants growth under controlled conditions. //In: Prediction and measurement of photosynthetic productivity. – Wageningen, PUDOC, 1970. – P. 221–229.
15. *Reynolds J. F., Thornley J. H. M.* A shoot: root-partitioning model. //Ann. Bot., 1982, v. 49, № 5. P. 585–597.
16. *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.– 318 p.

Моделювання періоду осінньої вегетації озимої пшениці. Антоненко В.С.

Моделюється вплив факторів довкілля на процеси фотосинтезу, дихання, росту озимої пшениці. Розглядається ріст головного і бічних пагонів.

Ключові слова: фотосинтез, дихання, сонячна радіація, температура, вологість ґрунту, ріст, корені, пагони.

Modeling of the period of autumn vegetation of a winter wheat. Antonenko V.

Influence of environment factors on processes of photosynthesis, breath, growth of winter wheat is modeled. Growth of the main thing and lateral shoots is considered.

Key words: photosynthesis, breath, solar radiation, temperature, soil moisture, growth, roots, shoots.