

ности культуры, которая зависит от трех настраиваемых параметров. Оптимальные значения параметров определялись по минимальному расхождению между расчетными и фактическими значениями урожайности яровой пшеницы. Средняя относительная погрешность расчетной величины урожайности составила 12%.

По результатам проведенной идентификации можно сделать следующие *выводы*: блоки динамики почвенной влаги и фенологического развития модели *Agrotool* достаточно хорошо идентифицируются по данным региона. Блок продуктивности растений требует модификации. Необходимо осуществлять оценку урожайности в зависимости от типа почв и сорта культуры.

Численные эксперименты с использованием оптимизационных процедур поиска глобального минимума в задаче идентификации параметров модели и анализа на чувствительность позволили разработать критерии точности задания областей допустимых значений параметров и выявить особенности настройки параметров блоков модели.

Результаты проведенного исследования продемонстрировали эффективность описанного подхода и позволили дать высокую оценку применению модели *Agrotool* для прогноза урожайности зерновых культур в условиях Алтайского края.

Литература

1. Хворова Л. А. Идентификация параметров модели фенологического развития зерновых культур в условиях Алтайского края // *Обозрение прикладной и промышленной математики*. 2010. Т. 17. Вып. 3. С. 470–472.
2. Хворова Л. А. Методы исследования чувствительности моделей продуктивности агроэкосистем // *Известия АлтГУ*. 2013. № 1. С. 128–132.
3. Хворова Л. А. Оптимизация процесса структурно-параметрической идентификации моделей продуктивности агроэкосистем // *Известия АлтГУ*. 2012. № 1. С. 171–175.
4. Хворова Л. А., Топаж А. Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2011. № 1. С. 99–105.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ И ОЖИДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В СТЕПНОЙ ЗОНЕ РОССИИ И КАЗАХСТАНА

В. Н. Павлова, С. Е. Варчева

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии»

Согласно прогностическим оценкам ФАО, для удовлетворения ожидаемого спроса средняя урожайность зерновых культур в мире должна возрасти к 2020 году с современных 2,9 до 5 тонн с гектара. В настоящее время средняя урожайность в большинстве стран азиатского региона не превышает 1,5 тонн зерна с гектара (Шиятый, Голиков, 2010).

Степная зона России и Казахстана относится к зоне рискованного земледелия, где уровень производства зерна решающим образом зависит от погодных и климатических условий. Важную роль при этом играет степень адаптированности степного земледелия к условиям природной среды. Для реализации приспособленных к погодно-климатическим условиям стратегий при производстве зерна необходима достаточно адекватная математическая модель продуктивности зерновых культур.

Представлена динамическая модель яровой пшеницы, используемая для оценки влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата в степной зоне (Vera N. Pavlova et al., 2014). Новым аспектом развития динамической модели является адаптивный подход к описанию процесса роста (ростовых функций) растений. В модели учитываются адаптационные механизмы растения и отражается влияние водного дефицита на процессы органогенеза.

Согласно современной теории продуктивности агроэкосистем, процесс формирования урожая достаточно адекватно описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{dM}{dt} = \Phi(M) - R_0 M - R_R \frac{dM}{dt}, \quad (1)$$

где M – сухая биомасса посева; $\Phi(M)$ – суммарный фотосинтез посева как функция фотосинтезирующей поверхности; R_0 , R_R – параметры, определяющие скорость дыхания; t – время.

Для интегрирования уравнения (1) представим его в виде следующей системы разностных уравнений:

$$\begin{cases} M_S^j = M_S^{j-1} + K_R(\alpha_S^j \Phi^j - R_0^j M_S^{j-1} - q_{SZ} M_S^{j-1}), \\ M_r^j = M_r^{j-1} + K_R(\alpha_r^j \Phi^j - R_0^j M_r^{j-1} - q_{rZ} M_r^{j-1}), \\ M_Z^j = M_Z^{j-1} + K_R(\alpha_Z^j \Phi^j - R_0^j M_Z^{j-1} + q_{SZ} M_S^{j-1} + q_{rZ} M_r^j), \end{cases} \quad (2)$$

где M_S^j, M_r^j, M_Z^j – биомасса побегов, корней и зерна соответственно; $K_R = \Delta t / (1 + R_R)$, α_S^j , α_r^j и α_Z^j – ростовые функции ($\alpha_S^j + \alpha_r^j + \alpha_Z^j = 1$); Φ^j – суммарный фотосинтез посева за сутки; q_{SZ} и q_{rZ} – коэффициенты, определяющие потоки пластических веществ из вегетативных органов в репродуктивные; Δt – шаг по времени, равный суткам.

Для определения динамики запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы 10-слойная численная схема расчета влажности почвы параметризована в виде следующих уравнений регрессии (Сиротенко, 1981):

$$W_1^j = W_1^{j-1} + \Delta t(0,067D^j + 0,758P^j - 0,0035S^j D^j - 0,0086D^j W_1^{j-1} - 0,216), \quad (3)$$

$$W_2^j = W_2^{j-1} + \Delta t(0,048D^j + 0,7758P^j - 0,0032S^j D^j - 0,0027d^j W_2^{j-1} - 0,2944), \quad (4)$$

где W_1 , W_2 – влагозапасы в пахотном и метровом слоях почвы соответственно; D^j – дефицит влажности воздуха; P^j – сумма осадков; S^j – продолжительность солнечного сияния.

С учетом динамики вертикального распределения корней определяется эффективная влажность корнеобитаемого слоя W_f^j :

$$W_f^j = \mu_r^j W_1^j + (W_2^j - W_1^j) \cdot (1 - \mu_r^j). \quad (5)$$

Коэффициент μ_r^j , определяющий долю корней в пахотном слое почвы, связан с массой корней следующим соотношением:

$$\mu_r^j = 1 - \exp\left[-q_r \frac{20\rho_r}{M_r^j}\right], \quad (6)$$

где M_r^j – текущая масса корней; q_r и ρ_r – константы.

Углекислотный и водный режимы посева регулируются устьичным сопротивлением (r_{st}), которое зависит от водного потенциала и интенсивности поглощаемой солнечной радиации. Для расчета r_{st} используется следующая зависимость (Полуэктов, 1991):

$$r_{st} = \frac{r_{\min} \Psi_{\max} + C_S \Psi_S^j}{\Psi_{\max} - \Psi_S^j} \cdot \frac{Q_L^j + q_S}{Q_L^j}, \quad (7)$$

где Ψ_S^j , Ψ_{\max} – текущий и максимально возможный водный потенциал корнеобитаемого слоя почвы; r_{\min} – минимально возможное устьичное сопротивление; C_S и q_S – эмпирические коэффициенты.

Полагается, что водный потенциал почвы экспоненциально связан с влагозапасами:

$$\Psi_S^j = \Psi_{\max} \exp\left(-7,76 \frac{W_f^j}{W_{PW}}\right), \quad (8)$$

где W_{PW} – полевая влагоемкость почвы.

В динамических моделях первого поколения ростовые функции задавались как однозначные аналитические функции биологического времени, измеряемого суммами эффективных температур воздуха. Очевидно, что детерминированное распределение ассимилятов не позволяет учесть адаптационные механизмы растения и отразить влияние внешних условий на процессы органогенеза. К настоящему времени предложено множество «адаптационных» моделей, в рамках которых «ростовые функции» определяются в результате решения той или иной задачи оптимального управления (Полуэктов и др., 2006).

В данной модели адаптационный подход реализован следующим образом. Учитывая, что в условиях аридного климата адаптация к условиям увлажнения является ведущим фактором, определяющим соотношение подземной и надземной массы растений, предлагается следующая ростовая функция для корневой системы:

$$\alpha_r^j = \alpha_{r\max} \left(1 - \left(\frac{V^j}{V_F}\right)^{a_r}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{W_f^j}{W_{\max}}\right)^{a_w}\right), \quad (9)$$

где $\alpha_{r\max}$ – максимальное значение функции; V^j , V_F – суммы эффективных температур воздуха на j -е сутки и на конец вегетации соответственно; W_{\max} –

максимально возможные эффективные влагозапасы почвы; a_r и a_w – константы. При постоянных влагозапасах ростовая функция корней является монотонно убывающей функцией времени. С увеличением влажности почвы ростовая функция корней убывает быстрее ($\alpha_r^j \rightarrow 0$ при $W_f^j \rightarrow W_{\max}$).

Ростовая функция репродуктивных органов (колосьев для пшеницы) представляется следующей функцией от биологического времени V^j :

$$\alpha_Z^j = \hat{\alpha}_Z^j + \left(1 - \hat{\alpha}_Z^j\right) \left[1 - \left(\frac{W_f^j}{W_{\max}}\right)^{b_w}\right], \quad (10)$$

где $\hat{\alpha}_Z^j = \alpha_{Z_{\max}}^j \left[1 - \left(\frac{V_F - V^j}{V_F - V_R}\right)^{c_Z}\right]$, если $V^j > V_R$, иначе $\hat{\alpha}_Z^j = 0$,

здесь c_Z и b_w – коэффициенты.

Для идентификации параметров модели использованы данные полевых опытов на яровой пшенице Научно-производственного центра зернового хозяйства имени А. И. Бараева в Казахстане (метеостанция Шортанды) за период с 1986 по 2009 гг. и данные агрометстанции Ершов (Саратовская область, Россия) за период наблюдений с 1951 по 1981 гг.

На рис. 1 представлены результаты проверки адекватности модели для двух указанных пунктов. Продемонстрировано, что коэффициент корреляции между рассчитанными и фактическими урожаями (r) достаточно высок и составляет 0,876 для агрометстанции Ершов и 0,852 для метеостанции Шортанды, т. е. модель воспроизводит порядка 73–77% дисперсии урожаев пшеницы. Среднее квадратическое отклонение (СКО) составило соответственно 3,26 и 3,07 ц/га.

Результаты численных экспериментов показали, что для степной зоны России и Казахстана дефицит почвенной влаги в течение вегетационного периода может вызвать снижение урожая на 20–25%, а в экстремальные годы – до 40%; при этом увеличивается коэффициент изменчивости урожайности.

Модель продемонстрировала удовлетворительное воспроизведение уровней урожайности пшеницы как в местном масштабе в контролируемых условиях (Шортанды), так и в региональном (Ершов). При этом она воспроизводит порядка 73–77% дисперсии урожаев пшеницы для двух удаленных районов степной зоны Евразии. Это позволяет использовать ее для решения прикладных задач, таких, например, как диагностика агрометеорологических условий формирования урожая и оценка влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Установлено, что модель достаточно адекватна для решения задач оценки влияния колебаний и изменений климата в системах мониторинга и прогнозирования урожайности для аридных районов Северной Евразии.

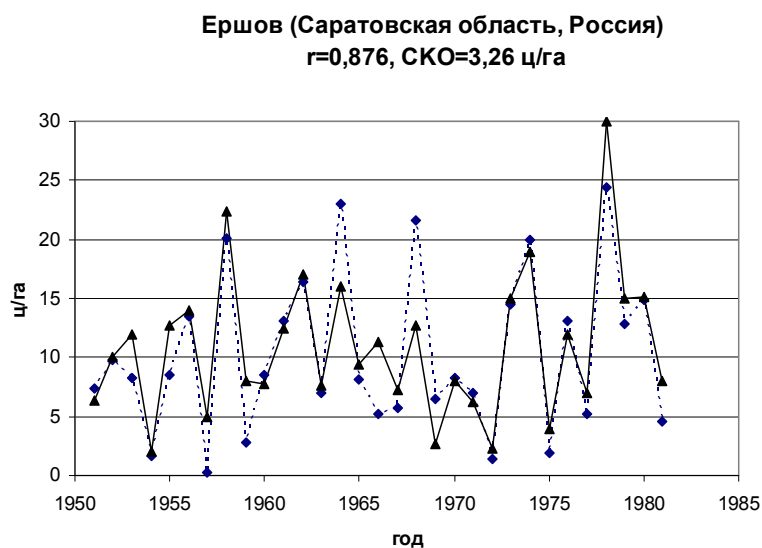


Рис. 1. Динамика фактических (Y_f) и рассчитанных (Y) урожаев яровой пшеницы

Литература

1. Полуэктов Р. А. Динамические модели агроэкосистемы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 312 с.
2. Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд. С.-Петербургского университета, 2006. 392 с.
3. Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 168 с.
4. Сиротенко О. Д. Пути развития агрометеорологии // Метеорология и гидрология. 1990. № 6. С. 101–108.
5. Шиятый Е. И., Голиков И. П. Мониторинг и прогнозирование урожайности зерновых культур в Азиатском регионе СНГ. – <http://agrosektor.kz/agrarnaya-nauka/statichenykh/item/2010-12-25-08-25-26.html>
6. Vera N. Pavlova, Svetlana E. Varcheva, Raushan Bokusheva, Pierluigi Calanca. Modelling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan. J. Ecological Modelling 277 (2014), p. 57–67.