



Федеральная служба по гидрометеорологии  
и мониторингу окружающей среды

Всероссийский НИИ  
сельскохозяйственной метеорологии

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

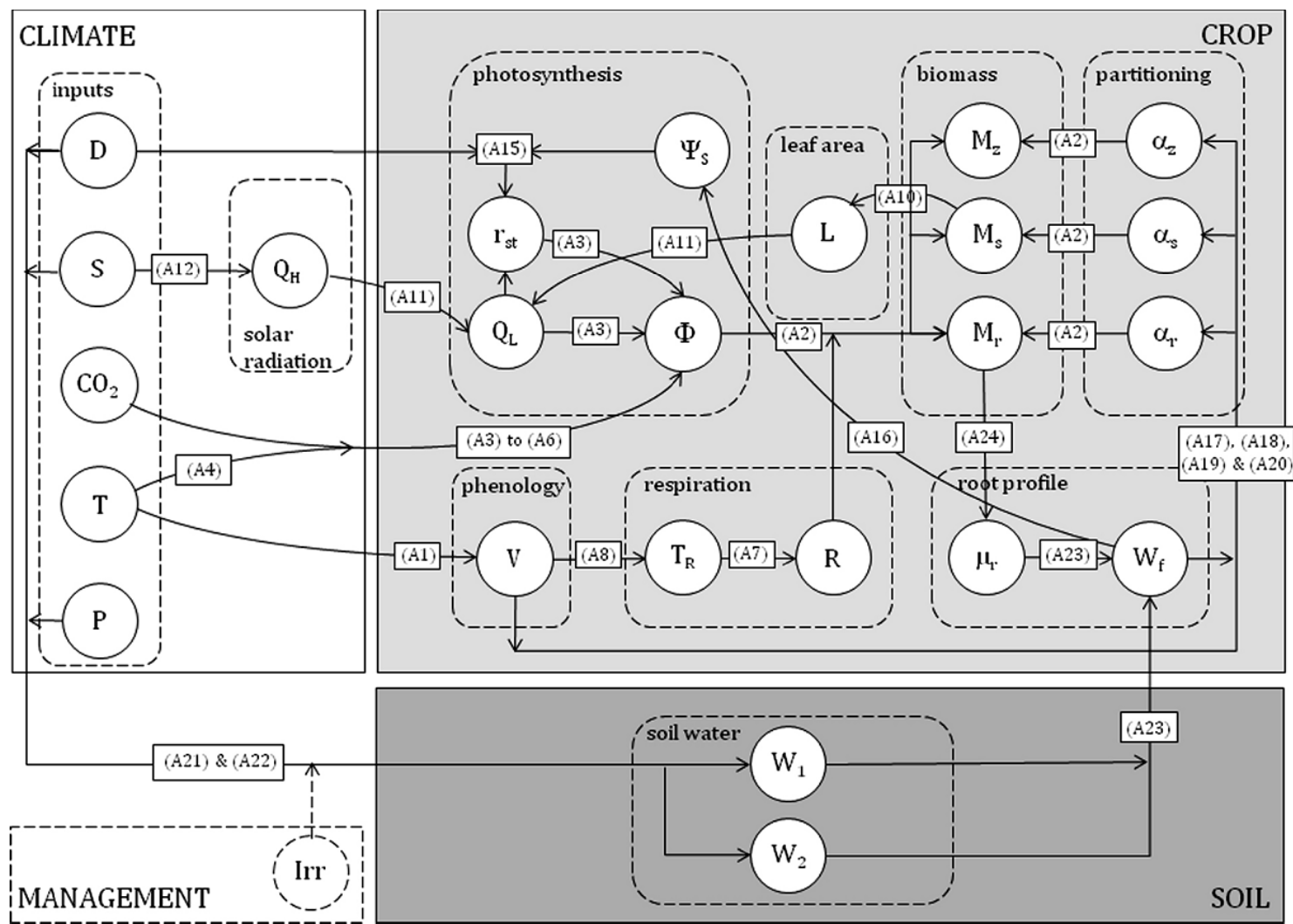
Павлова В.Н., Варчева С.Е.

**По оценкам ФАО**, для удовлетворения ожидаемого спроса на зерно 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.



# Концептуальная диаграмма модели



## Дифференциальное уравнение динамики биомассы посева

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

$M$  – сухая биомасса посева

$\Phi(M)$  – суммарный фотосинтез посева

$R_0, R_R$  – параметры, определяющие скорость дыхания

$t$  – время, сут.

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

$$K_R = \Delta t / (1 + R_R),$$

$M_S^j, M_r^j, M_Z^j$  – биомасса побегов, корней и зерна соответственно

$\alpha_S^j, \alpha_r^j, \alpha_Z^j$  – ростовые функции  $\alpha_S^j + \alpha_r^j + \alpha_Z^j = 1$

$\Phi^j$  – суммарный фотосинтез посева за сутки

$q_{SZ}, q_{rZ}$  – коэффициенты для потоков пластических веществ из вегетативных органов в репродуктивные

$\Delta t$  – шаг по времени, сут.

## Динамика запасов продуктивной влаги пахотного и метрового слоев почвы

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

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

$W_1, W_2$  – запасы продуктивной влаги пахотного и метрового слоев почвы

$D^j$  – дефицит влажности воздуха

$P^j$  – сумма осадков

$S^j$  – продолжительность солнечного сияния

## Эффективная влажность корнеобитаемого слоя

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

## Коэффициент, определяющий долю корней в пахотном слое почвы

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

где  $M_r^j$  – текущая масса корней,  $q_r$  и  $\rho_r$  – константы.

## Ростовая функция корней

$$\alpha_r^j = \alpha_{r\max} \left( 1 - \left( \frac{V^j}{V_F} \right)^{a_r} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{W^j}{W_{\max}} \right)^{a_W} \right)$$

$\alpha_{r\max}$  – максимальное значение функции

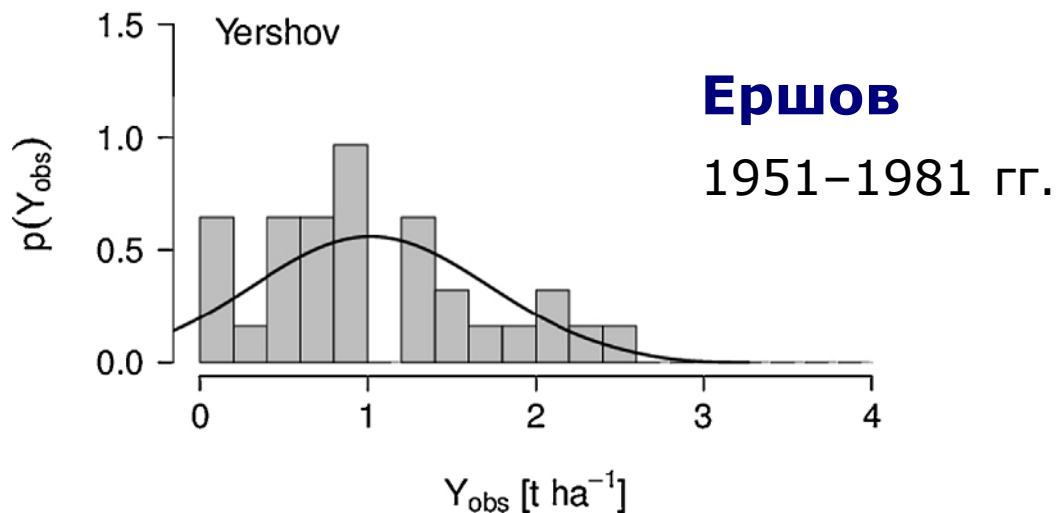
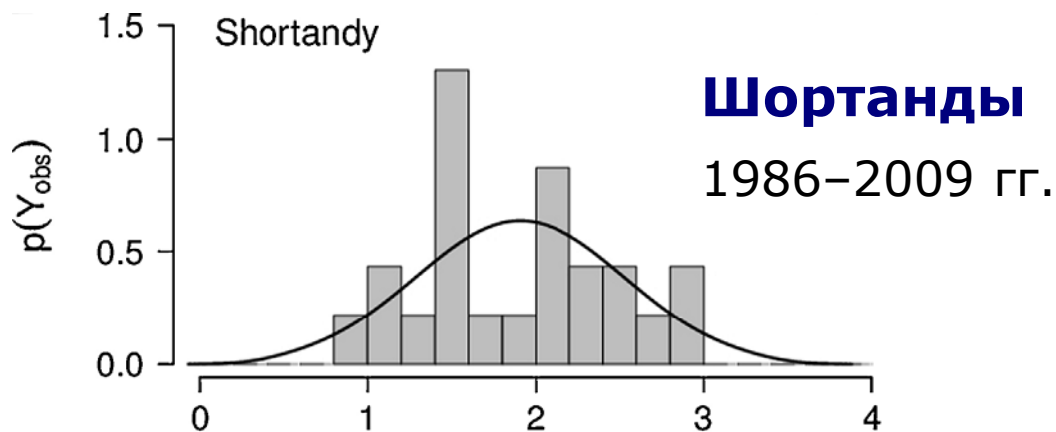
$V^j, V_F$  – суммы эффективных температур воздуха на  $j$  сутки и на конец вегетации

$W_{\max}$  – максимально возможные эффективные запасы влаги в почве

$a_r$  и  $a_W$  – константы



# Гистограмма распределения урожайности яровой пшеницы



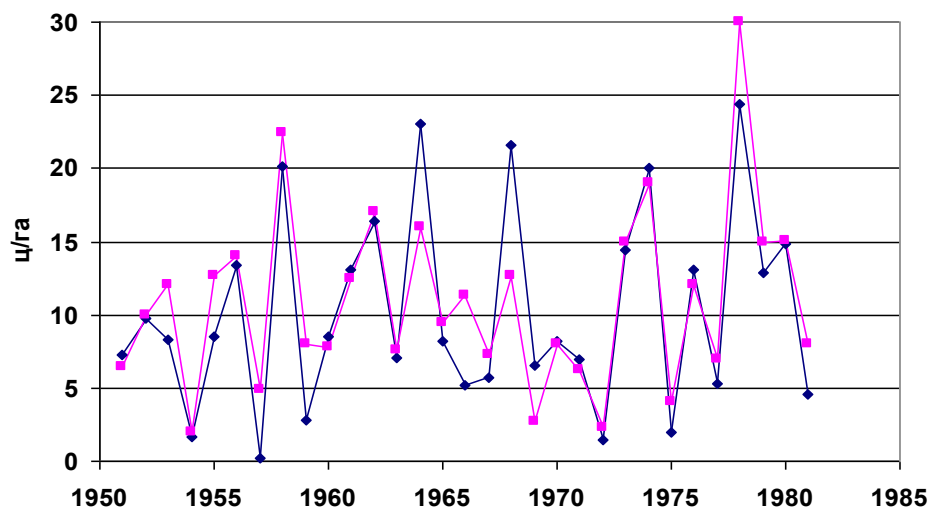
## Критерии оценки точности модели

Станция	$\bar{Y}_{obs}$	$\bar{Y}_{sim}$	$MBE$	$RMSE$	$rRMSE$	$R^2$
Шортанды	1,89	1,91	0,01	0,31	0,16	0,73
Ершов (калибровка)	1,01	0,97	-0,04	0,33	0,33	0,74
Ершов (проверка)	1,25	1,33	0,08	0,30	0,24	0,69
Целиноград	0,98	0,97	0,00	0,15	0,15	0,76
Атбасар	1,10	0,98	-0,13	0,28	0,25	0,43

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{obs,i} - Y_{sim,i}|^v ; \quad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{obs,i} - Y_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - \bar{Y}_{sim})^2}$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{obs,i} - Y_{sim,i}) ; \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{obs,i} - Y_{sim,i})^2} ; \quad rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}_{obs}}$$

# Яровая пшеница



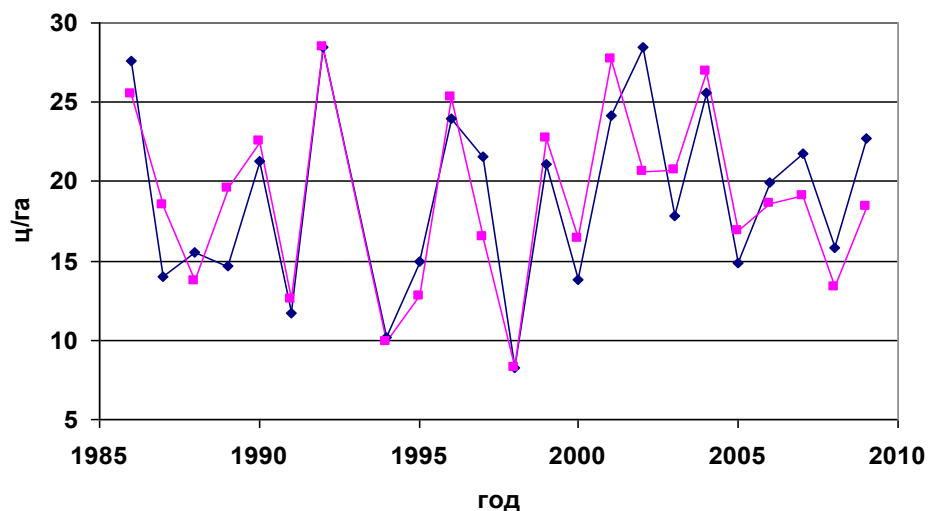
## Ершов

Саратовская область

1951–1981 гг.

Коэффициент корреляции = 0,876

Ср. квадр. отклонение = 3,26 ц/га



## Шортанды

НПЦ зернового хозяйства  
имени А.И. Бараева,  
Казахстан

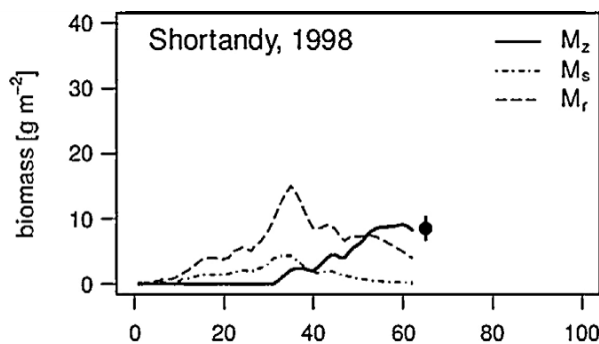
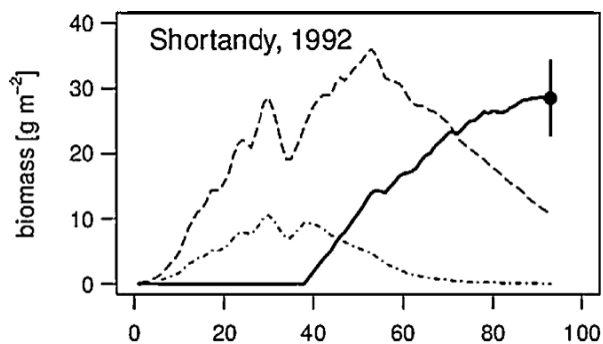
1986–2009 гг.

Коэффициент корреляции = 0,852

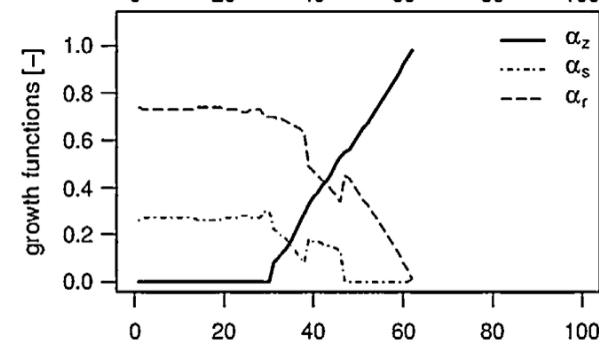
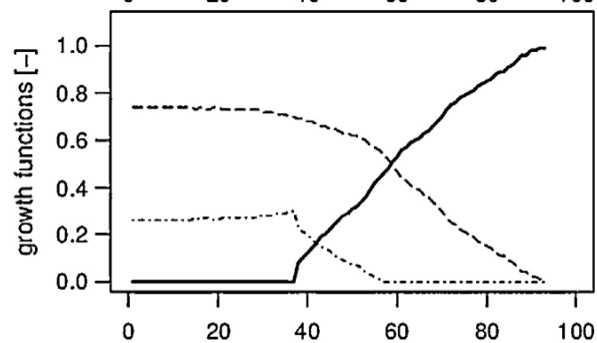
Ср. квадр. отклонение = 3,07 ц/га

— Y — Yf

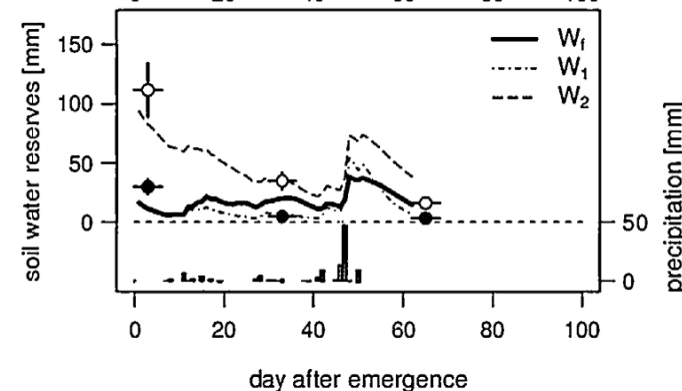
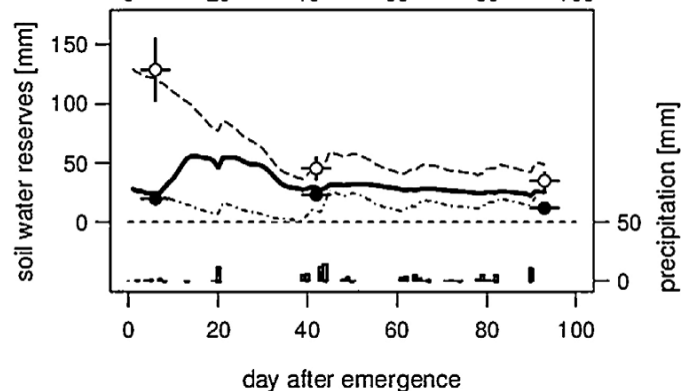
# Шортанды, 1992 и 1998 гг.



Динамика биомассы



Ростовые функции



Динамика запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы

## **Заключение**

Модель формирования урожая яровой пшеницы воспроизводит порядка 73–77% дисперсии урожаев пшеницы для нескольких удаленных районов степной зоны Евразии.

### **Модель может использоваться для решения прикладных задач:**

- диагностика агрометеорологических условий формирования урожая;
- прогнозирование урожайности для аридных районов Северной Евразии в системах мониторинга;
- оценка влияния колебаний и изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Спасибо за внимание!