

## **Долгосрочное прогнозирование урожайности полевых культур в Оренбургском Приуралье на основе ретроспективной экстраполяции временного ряда**

*А.А. Неверов, к.с.-х.н., ФБГНУ ФНЦ БСТ РАН*

В биологических исследованиях большое значение для решения задачи долгосрочного прогнозирования предстоящих событий придаётся длине временного ряда и достоверности его показателей.

На процессы формирования урожайности сельскохозяйственных культур оказывает влияние совокупность различных биотических и абиотических факторов.

Точность прогнозирования осреднённой урожайности, например по административному району, существенно зависит от таких факторов, как равно-

мерность распределения посевов по территории, отсутствие резких аномалий продуктивности, вызванных революционным воздействием человека. В идеальном случае временной ряд должен зависеть только от естественных природных факторов, детерминирующих дисперсию результивного признака. Однако сформировать подобный ряд урожайности, зеркально отражающий воздействие только периодических колебаний биосистемы без участия человека, не получается. Поэтому временной ряд урожайности сельскохозяйственных культур, в нашем понимании, представляет собой аддитивный тип модели, определяемый формулой:

$$Y = T + C + e, \quad (1)$$

где  $Y$  – урожайность;

$T$  – трендовая;

$C$  – циклическая;

$e$  – нерегулярная или случайная компоненты временного ряда.

Многолетние изменения климата, а также уровня агротехники (севообороты, удобрения и т.д.) воздействуют на продуктивность посевов, постепенно изменяя агрофон, и находят своё отражение в трендовой составляющей урожайности. Трендовая компонента получается в результате сглаживания временного ряда методом взвешенной скользящей средней.

Инерция тренда позволяет достаточно точно прогнозировать предстоящее значение данной компоненты в будущем.

Основная задача прогнозирования предстоящего значения временного ряда сводится к прогнозированию циклической компоненты при минимальном значении ошибки (случайной компоненты) [1].

Опыт прогнозирования [2–9] показывает, что длина временного ряда должна быть максимально большой, на практике же из архивных документов по Оренбургской области известно, что первая отчётность по урожайности полевых культур датируется примерно с 1886 г. Однако существенный вклад в формирование урожайности полевых культур нашей страны внесли нестабильность экономики в периоды социальных потрясений: Первая мировая война (1914–1918 гг.), Гражданская (1917–1922 гг.) и Вторая мировая (1939–1945 гг.) войны, массовая гибель крестьян в периоды голодомора (1921–1922 гг., 1932–1933 гг.). Статистические данные по урожайности сельскохозяйственных культур в эти годы и последующие периоды восстановления народного хозяйства носят характер аномалий и искажают реальную картину изменчивости продуктивности растений под влиянием природных факторов.

Примерно с начала 2000-х гг. и по настоящее время происходят революционные изменения в сельском хозяйстве, выражающиеся в изменении структуры посевных площадей, севооборотов, резком сокращении применения удобрений, что увеличивает случайную компоненту и ухудшает точность прогноза.

В последние годы появилось достаточно много сообщений о многолетних (от сотен до тысяч и даже миллионов лет) реконструкциях различных параметров (региональной температуры, осадков, активности Солнца, вариаций атмосферной циркуляции) по концентрации  $^{14}\text{C}$  в кольцах деревьев, содержанию континентальных и океанических аэрозолей в кернах льда и т.д. [10–12].

**Цель исследования** – установить возможность прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур по достоверным, но коротким временным рядам, не превышающим 30 лет, с помощью ретроспективной экстраполяции этого ряда на погодные условия.

**Материал и методы исследования.** Исследование проведено на примере кукурузы, как одной из ведущих полевых культур в Оренбуржье. Для статистического анализа временного ряда урожайности зерна кукурузы (1987–2017 гг.) по результатам полевых исследований Оренбургского НИИСХ применялись методы пошаговой регрессии. Ретроспективная экстраполяция временного ряда до 1951 г. проводилась по отобраным предикторам (метеорологическим факторам) в нейросетевом анализе в задачах регрессии (программа «Statistica 6.1»).

Прогнозирование урожайности на предстоящий 2018 г. осуществлялось с использованием методов остаточных отклонений в совокупности с методом наложения эпох в авторской программе «Prognostics».

**Результаты исследования.** На первом этапе анализа получена компьютерная модель множественной регрессии на погодные условия Оренбургского района Оренбургской области, достоверно описывающая 98% дисперсии урожая кукурузы (табл. 1).

Пошаговый метод множественной регрессии выполнял в наших исследованиях роль фильтра для отбора наиболее значащих факторов погоды, определяющих урожайность кукурузы в условиях выбранного региона.

Для ретроспективной экстраполяции временного ряда использовался метод нейросетевого анализа в задачах регрессии на предварительно отобранные предикторы, детерминирующие дисперсию урожая кукурузы.

Модели формировались путём итеративного обучения многослойного персептрона с параллельным тестированием в контрольной и тестовой выборках (табл. 2, 3).

В результате обучения многослойного персептрона получены две модели – № 1137 и № 1145, удовлетворяющие нас по статистическим критериям оценки всех трёх выборок: обучающей, контрольной и тестовой. В данном случае для нас важно свести к минимуму нерегулярную компоненту или отношение стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных, оно не должно

быть больше 0,15. В нашем случае по разным выборкам и моделям показатель варьирует от 0,04 до 0,14, что характеризует высокий уровень качества моделей.

Из моделей получен ансамбль, усредняющий показатели урожайности кукурузы, представленный в таблице 3 под названием «Уф, факт».

Таблица 3 представляет собой фрагмент вывода результатов прогнозирования урожайности в авторской программе «Prognostics» с высокой оценкой моделирования: относительная ошибка по всему ряду наблюдений – 1,3%, коэффициент множественной детерминации – 0,99. Для тестирования модели использован период с 2005 по 2016 г. (рис.).

1. Зависимость урожайности зерна кукурузы от погодных условий (1987–2017 гг.) на опытном поле Оренбургского НИИСХ

Фактор погоды: месяц, декада*	Стандартизованный бэта-коэффициент	Коэффициент регрессии	T-критерий Стьюдента для оценки коэффициента	P-значение
Начальная ордината		3,324632	6,2	0,000
ДВВ, июль	-0,98	-0,251196	-17,7	0,000
∑ осадков, март – апрель	0,50	0,022562	10,7	0,000
T, ноябрь пр. г, 1-я	-0,54	-0,188515	-9,8	0,000
T <sub>max</sub> , май, 2	0,26	0,077847	5,5	0,000
Осадки, ноябрь пр. г.	0,29	0,017682	5,8	0,000
∑ осадков, июль, 2-я – август, 1-я	-0,46	-0,015721	-4,9	0,000
ДВВ, сентябрь пр. г., 3-я	0,17	0,069826	4,0	0,000
T, апрель, 3-я	-0,13	-0,038375	-3,2	0,005
T <sub>min</sub> , ноябрь пр.г., 1-я	-0,21	-0,041185	-3,4	0,003
Осадки, август, 1-я	0,21	0,013347	2,8	0,012

Коэффициенты множественной: регрессии R = 0,99, детерминации R<sup>2</sup> = 0,98  
F(10,17) = 69,0, стандартная ошибка оценки – 0,2 т с 1 га; P < ,00000

Примечание: \* – единицы измерения факторов погоды: осадки, мм; T – средняя температура воздуха, °C; T<sub>max</sub> и T<sub>min</sub> – максимальная и минимальная температура воздуха, °C; ДВВ – средний дефицит влажности воздуха, гПа; ∑ – сумма

2. Описательная статистика оценки нейросетевых моделей урожайности кукурузы

Статистический показатель	Обучающая выборка модели № 1137	Обучающая выборка модели № 1145	Контрольная выборка модели № 1137	Контрольная выборка модели № 1146	Тестовая выборка модели № 1137	Тестовая выборка модели № 1146
Среднее данных	2,88	2,82	2,16	2,69	3,63	3,59
Ст. откл. данных	1,07	1,09	0,33	0,63	1,32	1,24
Среднее ошибки	-0,005	-0,003	0,018	-0,0008	-0,033	-0,565
Ст. откл. ошибки	0,15	0,15	0,04	0,03	0,08	0,21
Среднее абсолютной ошибки	0,11	0,11	0,05	0,03	0,08	0,56
Отношение ст. откл. ошибки к ст. откл. данных	0,14	0,14	0,13	0,04	0,06	0,17
Корреляция	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

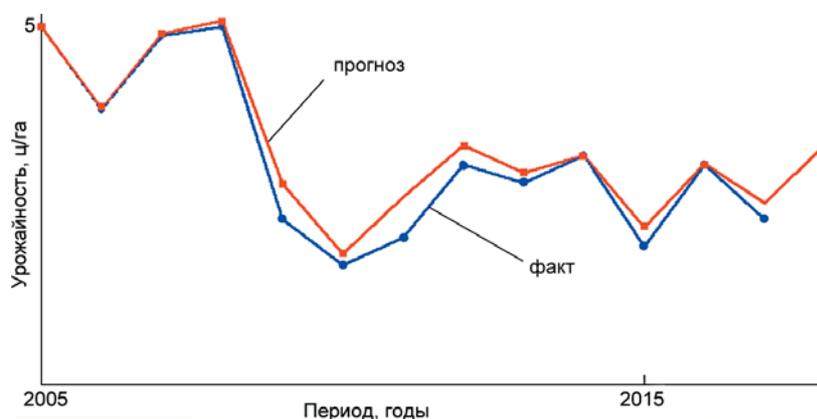


Рис. – Тестирование прогнозной модели урожая кукурузы (фрагмент программы «Prognostics»)

3. Прогноз на 2018 г. урожайности зерна кукурузы на основе ретроспективной экстраполяции временного ряда

Фаза-24			Фаза-24			Относительная ошибка тести- рования, %
период, год	Уф, факт, т с 1 га	Ур, модель, т/га	период, годы	Уф, факт, т/га	Ур, модель, т/га	
1951	1,70	1,73	1985	3,70	3,75	
1952	4,90	4,92	1986	4,50	4,45	
1953	1,80	1,80	1987	3,30	3,29	
1954	3,80	3,90	1988	1,70	1,72	
1955	2,30	2,27	1989	3,30	3,26	
1956	2,40	2,43	1990	5,10	5,03	
1957	2,60	2,61	1991	2,70	2,64	
1958	4,10	4,05	1992	5,20	5,08	
1959	2,10	2,13	1993	3,50	3,44	
1960	5,20	5,27	1994	4,90	4,77	
1961	4,80	4,91	1995	2,00	2,00	
1962	3,40	3,48	1996	2,40	2,38	
1963	5,20	5,29	1997	4,30	4,32	
1964	5,10	5,24	1998	1,80	1,78	
1965	3,00	3,00	1999	2,30	2,21	
1966	2,80	2,83	2000	3,20	3,14	
1967	1,50	1,49	2001	1,60	1,53	
1968	4,00	4,04	2002	2,60	2,55	
1969	5,00	5,20	2003	3,10	3,12	
1970	2,60	2,65	2004	4,50	4,02	
1971	5,30	5,54	<b>2005</b>	<b>3,90</b>	<b>3,91</b>	<b>0,15</b>
1972	3,80	3,88	<b>2006</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>0,13</b>
1973	2,20	2,19	<b>2007</b>	<b>3,80</b>	<b>3,79</b>	<b>0,20</b>
1974	3,70	3,70	<b>2008</b>	<b>3,90</b>	<b>3,94</b>	<b>0,41</b>
1975	2,30	2,30	<b>2009</b>	<b>1,80</b>	<b>2,10</b>	<b>3,70</b>
1976	4,00	4,00	<b>2010</b>	<b>1,30</b>	<b>1,66</b>	<b>7,75</b>
1977	2,60	2,60	<b>2011</b>	<b>1,60</b>	<b>1,75</b>	<b>7,94</b>
1978	4,60	4,60	<b>2012</b>	<b>2,40</b>	<b>2,54</b>	<b>7,69</b>
1979	2,40	2,40	<b>2013</b>	<b>2,20</b>	<b>2,29</b>	<b>7,28</b>
1980	3,10	3,10	<b>2014</b>	<b>2,50</b>	<b>2,52</b>	<b>6,62</b>
1981	1,90	1,90	<b>2015</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>7,54</b>
1982	5,00	4,90	<b>2016</b>	<b>2,40</b>	<b>2,41</b>	<b>6,95</b>
1983	4,40	4,38	<b>2017</b>	<b>1,80</b>	<b>1,96</b>	<b>7,11</b>
1984	5,20	5,07	<b>2018</b>		2,18	
Относительная ошибка модели: 1,3%						
Абсолютная ошибка модели: 0,09 т/га						
Козф-т множественной детерминации: 0,99						
Критерий достоверности Стьюдента: 111,2314						

После обучения показатели 2017 г. использовали в качестве внешнего теста с последующей экстраполяцией на 2018 г.

В основе долгосрочного прогнозирования методом остаточных отклонений в совокупности с методом наложения эпох, подробно описанных в наших ранних работах [2–9], использовался принцип суперпозиции циклов, обусловленных изменением взаимного расположения космических тел Солнечной системы.

**Выводы.** Ретроспективная экстраполяция временного ряда урожайности полевых культур,

достоверно отражающего колебания естественных факторов окружающей среды, способствует возможности прогнозировать не только урожайность, но и повысить точность прогноза.

**Литература**

1. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 319 с.
2. Тихонов В.Е., Неверов А.А., Кондрашова О.А. К проблеме долгосрочного прогнозирования урожайности // Аграрная наука. 2012. № 9. С. 12–15.
3. Тихонов В.Е. Долгосрочное прогнозирование урожайности / В.Е. Тихонов, А.А. Неверов, О.А. Кондрашова [и др.] // Аграрная наука. 2013. № 7. С. 12–15.

4. Тихонов В.Е., Кондрашова О.А., Неверов А.А. Применение методов нелинейного описания солнечно-земных связей к прогнозированию урожайности в степном Предуралье // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 2. С. 56–59.
5. Тихонов В.Е., Неверов А.А., Кондрашова О.А. Методология долгосрочного прогнозирования урожайности. Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2014. 157 с.
6. Тихонов В.Е., Неверов А.А. Долгосрочное прогнозирование урожайности в степной зоне Урала на основе современных методов оценки солнечно-земных связей // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 4 (61). С. 86–92.
7. Тихонов В.Е., Неверов А.А. Движение Земли вокруг барицентра Солнечной системы как информационная основа долгосрочного прогнозирования урожайности // Аграрный вестник Урала. 2015. № 12 (142). С. 24–29.
8. Тихонов В.Е., Неверов А.А. Моделирование ожидаемой урожайности в степном Предуралье с учётом лаговых переменных и изменения расстояния от центра масс Солнечной системы до Земли // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2016. № 1. С. 34–37.
9. Тихонов В.Е., Неверов А.А., Кондрашова О.А. Методология долгосрочного прогнозирования урожайности. Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2014. 157 с.
10. Борисенков Е.П. Климат и деятельность человека. М.: Наука, 1982. 132 с.
11. Огурцов М.Г. Квазивековая цикличность в климате Северного полушария Земли и её возможная связь с колебаниями активности Солнца / М.Г. Огурцов, Х. Юнгнер, М. Линдхольм, С. Хелама, В.А. Дергачёв // Солнечно-земная физика. 2007. Вып. 10. С. 10–15.
12. Распопов О.М. Интерпретация физических причин глобального и регионального климатических откликов на долговременные вариации солнечной активности / О.М. Распопов, В.А. Дергачёв, О.В. Козырева, Т. Комтрон, Е.В. Лопатин, Б. Лукман // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 276–278.