

УДК 332.1: 519.876

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

П.М. Мазуркин, С.И. Михайлова, Марийский государственный технический университет

Продуктивность земель [1] по урожайности сельскохозяйственных культур была рассмотрена нами за 1913—2003 гг. по территории Республики Марий Эл с убранной площади (по официальным статистическим данным).

Все зерновые. Урожайность рассматривается на трех уровнях: среднестатистическом, минимальном и максимальном.

Среднестатистическая тенденция, или основной тренд [2] динамики урожайности всех зерновых с убранной площади, на территории Республики Марий Эл (табл. 1) описывается формулой:

$$\bar{y} = 6,72 \exp(0,014732t^{0,90077}), \quad (1)$$

где \bar{y} — среднестатистическая урожайность всех зерновых культур, ц/га;

t — время, лет ($t = 0$ для 1913 г.).

Формула (1) является законом экспоненциального роста, и по ней прогноз возможен до 2100 г. При этом к 2030 г. в республике может быть достигнута урожайность на уровне максимальной урожайности в 1978 и 1990 гг., а к 2100 г. по всей республике — урожайность передовых сельхозпредприятий.

Минимум урожайности изменяется по статистической закономерности, описываемой формулой с двумя составляющими:

$$y_{\min} = 7,90 \exp(-5,4320t) + 0,01920t^{1,8523} \exp(-0,02426t). \quad (2)$$

В модели (2) первая составляющая является законом гибели, который широко известен в биологии (закон Ципфа), экономике (закон Парето) и физике (закон Мандельброта).

Первая составляющая характеризует естественную закономерность убыли продуктивности земель, а вторая и последующие — показывают, как правило, результаты антропогенного влияния.

Адекватность модели (2) оценивается максимальной относительной погрешностью Δ_{\max} , значение которой в табл. 2 подчеркнуто. В этом случае доверительная вероятность вычисляется как $D = 100 - |\Delta_{\max}|$, в данном примере доверие к формуле (2) будет равно не ниже $100 - 9,71 = 90,29\%$.

Таким образом, всю статистическую выборку можно оценивать на выявление основного тренда по формуле (1), оставляя далее разлагаемые остатки для последующей идентификации влияния климатических и иных факторов. Поэтому многофакторное моделирование (здесь не приводится) позволяет постепенно превращать делимые остатки Δy в неделимые остатки ϵ , и только по последним значениям оценивается адекватность всей статистической модели, содержащей несколько статистических зависимостей.

Максимум урожайности всех зерновых культур на территории Республики Марий Эл изменяется по статистической закономерности (табл. 3):

$$y_{\max} = 8,2868 \exp(0,002625t) + 8,5274 \cdot 10^{-10} t^{6,1989} \exp(-0,00183t^{1,7696}) - \alpha \cos(\pi t / \rho_{0,5} - 1,1217), \quad (3)$$

$$\alpha = 0,06742 t^{1,0026} \exp(-0,008875t),$$

$$\rho_{0,5} = 5,5864$$

где π — число «пи»;

α — амплитуда колебательного возмущения значений показателя, ц/га;

$\rho_{0,5}$ — половина периода колебания урожайности, лет.

Первая составляющая является известным законом экспоненциального роста (при интенсивности роста, равной единице), и эта естественная составляющая показывает положительную тенденцию роста максимальных урожаев всех зерновых культур на территории республики. Вторая составляющая является нашей формулой закона Гуттенберга убывающей доходности.

Интересно колебательное изменение максимальной урожайности всех зерновых. Половина периода циклического изменения равна 5,5864 года, то есть полный период колебания составляет $2 \times 5,5864 = 11,1728$ лет, что совпадает с циклом Чижевского, т.е. с циклом солнечной активности. Поэтому следует вывод о том, что на максимумы урожайности растений, в данном примере всех зерновых культур, влияют циклы солнечной активности. Перед третьей составляющей имеется знак «-», поэтому она является в целом кризисной закономерностью. Но из-за волнового изменения значений урожайности при отрицательных значениях y_{\max} происходит положительная прибавка общей урожайности земель. Следовательно, весь исследованный период (1913—2003 гг.) можно разделить на отдельные этапы:

— 1913—1971 гг., влияние солнечной активности было в основном кризисным и тормозило рост максимальной урожайности всех зерновых;

— 1974—2001 гг., солнечная активность помогала в поддержании должного уровня урожайности всех зерновых культур;

— 2002—2003 гг. и далее, когда максимум солнечной активности (ныне наблюдается завершение 23-го цикла с начала изучения солнечной активности) снижает ожидаемую максимальную урожайность зерновых культур;

— 2010—2030 гг., солнечная активность может помочь в росте урожайности всех зерновых культур на территории Республики Марий Эл;

— 2040—2080 гг., — этап торможения роста урожайности Солнцем.

Пшеница озимая. Эта зерновая культура характерна для условий республики, но официальные данные известны только с 1940 г. Поэтому шкала времени вводится с 1940 г., когда принимается.

Среднестатистическая тенденция выражается формулой

$$\bar{y} = 10,2840 \exp(0,06496t^{0,4776}). \quad (4)$$

Фактически достигнутый максимум урожайности (2,8 т/га) был в 1978 г. Прогноз возможен до $2003 + 63 = 2066$ г. Основной тренд показывает, что даже к 2060 г. еще останется значительный резерв повышения среднестатистической урожайности этой культуры.

Минимум урожайности озимой пшеницы изменяется по формуле

$$y_{\min} = 12,40 \exp(-1,31330t) + 3,35126t^{0,25294}. \quad (5)$$

Минимальная урожайность из-за влияния военных лет снижается с 1940 г., а затем медленно нарастает, продолжаясь по прогнозу до 2060 г. К этому времени она не достигнет урожайности 1940 г.

Таблица 1. Динамика урожайности всех зерновых культур с убранной площади в Республике Марий Эл, т/га

Год учета	Время t, лет	Фактическое значение урожайности \hat{y}	Расчетная урожайность \bar{y} по тренду (1)	Остаток Δy для учета влияния других факторов
1913	0	0,79	0,67	0,12
1940	27	1,07	0,90	0,17
1950	37	0,65	0,98	-0,32
1955	42	0,83	1,03	-0,20
1960	47	0,70	1,08	-0,38
1965	52	0,89	1,13	-0,24
1966	53	0,88	1,14	-0,26
1970	57	1,21	1,18	0,03
1971	58	1,54	1,19	0,35
1972	59	0,97	1,20	-0,23
1973	60	1,00	1,21	-0,21
1974	61	1,57	1,22	0,35
1975	62	1,12	1,23	-0,11
1978	65	1,97	1,27	0,70
1979	66	1,37	1,28	0,09
1985	72	1,70	1,34	0,36
1990	77	2,01	1,40	0,61
1995	82	1,29	1,47	-0,18
1996	83	1,81	1,48	0,33
1997	84	1,80	1,49	0,31
1998	85	1,33	1,50	-0,17
1999	86	0,91	1,52	-0,61
2000	87	1,07	1,53	-0,46
2001	88	1,69	1,54	0,15
2002	89	1,51	1,56	-0,05
2003	90	1,42	1,57	-0,15
Горизонт прогноза				
2010	97	—	1,67	—
2020	107	—	1,81	—
2030	117	—	1,97*	—
2040	127	—	2,14	—
2050	137	—	2,32	—
2060	147	—	2,52	—
2070	157	—	2,73	—
2080	167	—	2,95	—
2090	177	—	3,20	—
2100	187	—	3,46**	—

* Примерно равно максимальной фактической урожайности;
 ** максимальная урожайность, достигнутая в отдельных хозяйствах

Максимум урожайности озимой пшеницы изменяется так:

$$y_{\max} = 12,40 \exp(-0,04283t) + 3,0481 \cdot 10^{-10} t^{9,0486} \exp(-0,2058t). \quad (6)$$

В отличие от модели (3), здесь отсутствует третья волновая составляющая, т.к. она оказалась малозначимой.

Первая составляющая формулы (6) показывает естественную убыль продуктивности почвы по урожайности озимой пшеницы, вторая — что заинтересованность работников сельского хозяйства республики резко стала убывать с начала финансового кризиса в России (1998 г.), с учетом лага запаздывания от столицы в 2 года.

Картофель. Эта культура наиболее распространена на территории республики, поэтому изучение динамики представляет значительный интерес.

Среднестатистическая тенденция урожайности картофеля получила статистическую закономерность вида

$$\bar{y} = 64,14 \exp(0,17406 t^{0,29422}). \quad (7)$$

Как и в предыдущих примерах, эта закономерность для всех культур одинакова по конструкции (форме), поэтому

Таблица 2. Динамика минимальной урожайности всех зерновых культур в Республике Марий Эл, т/га

Год учета	Время t, лет	Фактически \hat{y}_{\min}	Расчетные значения (2)			Составляющие (2)	
			y_{\min}	ϵ	$\Delta, \%$	$y_{\min 1}$	$y_{\min 2}$
1913	0	0,79	0,79	-0,95	-0,00	0,79	0,0
1950	37	0,65	0,63	0,021	3,23	0,0	0,63
1960	47	0,70	0,79	-0,068	-9,71	0,0	0,77
1966	53	0,88	0,83	0,050	5,68	0,0	0,83
1999	86	0,91	0,91	-0,003	-0,33	0,0	0,91
2010	97	—	0,87	—	—	0,0	0,87
2020	107	—	0,82	—	—	0,0	0,82
2030	117	—	0,76	—	—	0,0	0,76
2040	127	—	0,70	—	—	0,0	0,70
2050	137	—	0,63	—	—	0,0	0,63
2060	147	—	0,56	—	—	0,0	0,56
2070	157	—	0,50	—	—	0,0	0,50
2080	167	—	0,44	—	—	0,0	0,44
2090	177	—	0,38	—	—	0,0	0,38
2100	187	—	0,33	—	—	0,0	0,33

Примечание: y_{\min} — минимальные расчетные значения урожайности земель; t — время с начала измерения статистических данных (1913 г.); ϵ — неделимые остатки — абсолютная погрешность формулы (2) по разнице, вычисляемой как $\epsilon = \hat{y}_{\min} - y_{\min}$; Δ — относительная погрешность, вычисляемая по далее неделимым остаткам ϵ с использованием математического выражения $\Delta = 100\epsilon/\hat{y}_{\min}$

Таблица 3. Динамика максимальной урожайности всех зерновых культур, т/га

Годы учета	Время t, лет	Фактически \hat{y}_{\max}	Расчетные значения (3)			Составляющие модели (3)			
			y_{\min}	ϵ	$\Delta, \%$	$y_{\max 1}$	$y_{\max 2}$	$\alpha, \text{ц/га}$	$y_{\max 3}$
1913	0	0,79	0,83	-0,039	-0,494	0,83	0,0	0,0	0,0
1940	27	1,07	0,91	0,157	1,467	0,89	0,03	1,4	0,01
1970	57	1,21	1,38	-0,170	-1,405	0,96	0,62	2,3	0,21
1971	58	1,54	1,38	0,164	1,065	0,96	0,65	2,4	0,24
1974	61	1,57	1,73	-0,155	-0,987	0,97	0,71	2,4	-0,05
1978	65	1,97	1,91	0,064	0,325	0,98	0,76	2,5	-0,16
1990	77	2,01	1,85	0,158	0,786	1,01	0,78	2,7	-0,06
1996	83	1,81	1,73	0,078	0,431	1,03	0,70	2,7	-0,0
1997	84	1,80	1,86	-0,064	-0,356	1,03	0,69	2,7	-0,15
2001	88	1,69	1,75	-0,056	-0,331	1,04	0,61	2,7	-0,09
2002	89	1,51	1,58	-0,067	-0,444	1,05	0,59	2,8	0,06
2003	90	1,42	1,43	-0,006	-0,042	1,05	0,57	2,8	0,20
2010	97	—	1,78	—	—	1,07	0,43	2,8	-0,28
2020	107	—	1,58	—	—	1,10	0,26	2,8	-0,23
2030	117	—	1,33	—	—	1,13	0,13	2,8	-0,08
2040	127	—	1,11	—	—	1,16	0,06	2,8	0,11
2050	137	—	0,97	—	—	1,19	0,02	2,8	0,24
2060	147	—	0,96	—	—	1,22	0,01	2,7	0,27
2070	157	—	1,07	—	—	1,25	0,0	2,7	0,19
2080	167	—	1,26	—	—	1,28	0,0	2,6	0,03
2090	177	—	1,45	—	—	1,32	0,0	2,5	-0,13
2100	187	—	1,58	—	—	1,35	0,0	2,4	-0,23

Примечание: у второй составляющей $y_{\max 2}$ максимум 0,8 т/га наблюдался при $t^* = 72$ года, т.е. в 1985 г. Максимальная амплитуда 0,28 т/га колебательного возмущения по третьей составляющей будет наблюдаться при $t^* = 97$ в 2010 г.

в общем виде формулы (1), (4) и (7) можно принять за устойчивый закон продуктивности сельскохозяйственных земель в среднестатистическом измерении.

По прогнозу, средняя урожайность картофеля к 2100 г. значительно уступит фактически достигнутой максимальной урожайности в 1995 г. (17,6 т/га). Глобальный

минимум (5,8 т/га), полученный в 1972 г., объясняется сильной засухой, когда летом температура воздуха достигала 42°C.

Минимальная урожайность картофеля характеризуется стабильным ростом по экспоненциальному закону, если не учитывать импульсную функцию снижения урожайности в 1972 г. Поэтому была получена формула

$$y_{\min} = 64,37 \exp(-0,00003357t^{1,9758}). \quad (8)$$

В прогнозе минимальный уровень урожайности картофельных полей на территории республики начнет превышать среднестатистическую урожайность примерно с 2075 г., достигнув при моменте $t = 162$ года значения 13,96 т/га.

Максимальная урожайность картофеля изменяется по зависимости

$$y_{\max} = 64,21 + 2,4962 \cdot 10^{-7} t^{6,2052} \exp(-0,09758t) - \alpha \cos(\pi t / \rho_{0,5} + 2,4970), \quad (9)$$

$$\alpha = 11,7052 t^{0,3256} \exp(-0,005663t),$$

$$\rho_{0,5} = 5,9361$$

На нее влияет «человеческий фактор», т.е. усилия по поддержанию уровня максимальной продуктивности земель под картофелем.

Первая составляющая показывает стабильное прошлое (до 1913 г.), характеризуясь устойчивым законом типа $y = y_0$ в 6,42 т/га.

Вторая и третья составляющие аналогичны статистической модели (3). При этом сдвиг начала кризисной волновой составляющей происходит на 2,4970 $\rho_{0,5}$ / π лет, т.е. на $2,4970 \times 5,9361 / 3,14156 = 4,72$ года (округленно на 5 лет). Тогда колебательное возмущение урожайности

картофеля начинается с $1913 + 5 = 1918$ г., т.е. с начала гражданской войны.

Прогнозы максимальной урожайности картофеля надежны до 2100 г. При этом наблюдались в прошлом и будут ожидать теоретически в будущем максимумы урожайности картофеля по Республике Марий Эл в следующие годы:

Год	Время, лет	Максимальная урожайность, т/га
1938	25	10,35
1950	37	13,12
1962	49	15,97
1974	61	17,27
2009	96	13,67
2021	108	12,08
2033	120	10,87
2045	132	10,44
2080	167	8,89
2092	189	8,75
2104	191	8,63

Эти прогнозные данные могут стать ориентирами при оценке кадастровой стоимости сельскохозяйственных земель под картофельными полями.

Предлагаемый способ применим на различных организационно-управленческих уровнях — от конкретного участка земли (например, одного поля) до сельского района, хозяйства каждого субъекта и всей РФ. По динамике урожайности и среднестатистическим тенденциям (посевные площади, сенокосы, пастбища, сады, участки под овощными культурами, ягодниками и др.) возможно сопоставление растениеводства на территории с данными по урожайности в различных странах и регионах мира. **□**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬХОЗУГОДИЙ FORECASTING OF EFFICIENCY OF FARMLAND

П.М. Мазуркин, С.И. Михайлова
P.M. Mazurkin, S.I. Mihailova

Резюме

Продуктивность земель по урожайности сельскохозяйственных культур рассмотрена за период 1913–2003 гг. по основанию прогноза и приведены статистические закономерности для прогнозирования до 2100г. С уборной площади по территории Республики Марий Эл дан анализ и прогноз по всем зерновым культурам, озимой пшенице и картофелю. Показано влияние на продуктивность сельхозугодий солнечной активности.

Resumé

Efficiency of the grounds on productivity of agricultural crops is considered for the period of 1913–2003 years on the basis of the forecast and statistical regularities for forecasting till 2100 are given. From the cleaned area on Republic of Mari El territory the analysis and the forecast on all grain crops, a winter wheat and a potato is given. Influence on efficiency of farmland of solar activity is shown.

Литература

1. Мазуркин, П.М. Рациональное природопользование: учебное пособие. В 3-х ч. Ч. 1: Экологически ответственное землепользование / П.М. Мазуркин, С.Е. Анисимов, С.И. Михайлова; под ред. П.М. Мазуркина. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 176 с.
2. Мазуркин, П.М. Математическое моделирование. Идентификация одно-факторных статистических закономерностей: Учебное пособие / П.М. Мазуркин, А.С. Филонов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 292 с.