

### Литература

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
2. Гончаренко А.А. Производство и селекция озимой ржи в России / А.А. Гончаренко // Зерновое хозяйство России. – 2010. – № 4. – С. 26–33.
3. Довбан К.И. Зелёное удобрение. – М.: Агропромиздат, 1990. – 208 с.
4. Сидерация – один из путей повышения адаптивности земледелия на серых лесных почвах Волго-Вятского региона / В.П. Заикин [и др.] // Системы земледелия Нечерноземной зоны Российской Федерации и пути их совершенствования. – Н. Новгород, 1997. – С. 18–19.
5. Рожь – национальное достояние страны // Ежедневное аграрное обозрение. – <http://agroobzor.ru/rast/a-112.html>.



УДК 639

*Н.В. Цугленок, С.Н. Никулочкина,  
В.В. Матюшев, В.К. Ивченко*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОДУКТИВНОСТИ И БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

*За 2000–2011-е годы исследовано периодическое действие фотосинтетически активной энергии на урожайность и биометрические показатели сортов яровой пшеницы в лесостепных зонах края, доказан квазипериодический характер течения этих процессов. Предлагается необходимый критерий устойчивости продукционного процесса. На примере Ужурского ГСУ даны результаты моделирования и прогнозирования продуктивности яровой пшеницы до 2030 года.*

**Ключевые слова:** яровая пшеница, урожайность, биометрические показатели, солнечная активность, прогнозирование процессов.

*N.V. Tsuglenok, S.N. Nikulochkina,  
V.V. Matyushev, V.K. Ivchenko*

### MODELING THE PRODUCTIVITY DYNAMICS AND BIOMETRIC PARAMETERS OF SPRING WHEAT

*In the course of the 2000–2011 years photosynthetically active energy periodic influence on productivity and biometric parameters of the spring wheat cultivars in the region forest-steppe zones is researched; pseudoperiodic character of these processes is proved. Necessary criterion for the production process stability is supposed. The results of modeling and forecasting the spring wheat productivity till 2030 are given on the example of Uzhur SCTS.*

**Key words:** spring wheat, productivity, biometric parameters, solar activity, process forecasting.

---

**Введение.** В системных экологических исследованиях необходимо учитывать, что снижение валовых сборов в неблагоприятный по солнечной активности год может превысить прибавку урожая в благоприятный год. Поэтому необходимо иметь возможность прогнозировать продуктивность яровой пшеницы для данного сельскохозяйственного района с учётом сопряжения временных циклов солнечной активности и устойчивости основных биометрических показателей.

**Цель исследований.** Разработать методику прогнозирования продуктивности яровой пшеницы с критерием биологической устойчивости для лесостепных зон Красноярского края.

**Задачи исследований**

- разработать квазипериодическую модель системы урожайности и биометрических показателей яровой пшеницы в условиях ГСУ лесостепной и степной зон;
- дать аналитический прогноз урожайности на 2012–2030 годы.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследований является система урожайности и биометрических показателей яровой пшеницы во временной и природно-экологической структурах. Использованы экспертно-аналитические методы, аппарат классической агрономической теории, компьютерная система Maple.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Динамика биометрических показателей сортов яровой пшеницы отражает изменение урожайности, высоты растений, продолжительности вегетации и степени поражения септориозом сортов Алтайская 60, Безим, Ветлужанка, Икар, Кантегирская 89, Мана 2, Новосибирская 15, Новосибирская 29, Омская 20, Омская 32, Омская 33, Саратовская 29, Скала, Тулун 15, Тулунская 12, – возделываемых на Бейском, Боградском, Дзержинском, Казачинском, Канском, Каратузском, Краснотуринском, Минусинском, Назаровском, Новосёловском, Саянском, Сухобузимском, Тывинском, Ужурском, Уярском, Ширинском ГСУ по модельным годам (начало – 2000 г., конец – 2011 г.) и представляется квазипериодическими функциями следующего вида [1–2]:

$$Q \approx c + \sum_{k=1}^{n_1} a_{1k} \cos \frac{2\pi kt}{T_1} + b_{1k} \sin \frac{2\pi kt}{T_1} + \sum_{k=1}^{n_2} a_{2k} \cos \frac{2\pi kt}{T_2} + b_{2k} \sin \frac{2\pi kt}{T_2} + \sum_{k=1}^{n_3} a_{3k} \cos \frac{2\pi kt}{T_3} + b_{3k} \sin \frac{2\pi kt}{T_3},$$

где  $t$  – временной параметр, модельный год;  $c$  – среднее значение моделируемого биометрического показателя за промежуток с 0-го по 11-й год;  $T_1, T_2, T_3$  – периоды действия солнечной радиации и двух производных факторов на исследуемый сорт;  $n_1, n_2, n_3$  – количество членов разложения по периодам  $T_1, T_2, T_3$ ;  $a_{1k}, a_{2k}, a_{3k}, k=1, 2, \dots$  и  $b_{1k}, b_{2k}, b_{3k}$  – отыскиваемые коэффициенты разложения функции в квазипериодический ряд Фурье.

В двусторонне устойчивом процессе развития растений все биометрические показатели согласованы с урожайностью в единой биологической системе, поэтому должны быть согласованы и их индексы. Поэтому в дальнейшем необходимые условия устойчивости будут сформулированы с помощью индексов урожайности и продолжительности вегетации.

Динамика продуктивности яровой пшеницы в Ужурском районе в зависимости от временного параметра  $t$  представляется следующей квазипериодической функцией, вычисленной с помощью прикладной Maple-программы:

$$u \approx 42,56 + 5,09 \cos 0,52t - 5,48 \sin 0,52t - 0,19 \cos 1,04t - 1,10 \sin 1,04t - 3,93 \cos 2,16t - 2,86 \sin 1,33t - 5,21 \cos 2,67t - 2,05 \sin 2,67t - 0,97 \sin 2,16t - 1,58 \cos 1,33t.$$

Качество приближения оценивается массивом отклонений экспериментальных данных от вычисленных по функции значений

$$\varepsilon = [1,21; -1,56; 1,21; -0,42, 0,54; -1,35; 1,35, -0,54, 0,42, -1,21; 1,56; -1,21],$$

которые лежат в диапазоне

$$-1,56 \dots 1,56$$

и рассеяны со стандартным отклонением

$$\sigma_\varepsilon = 1,13.$$

Таким образом, абсолютная ошибка приближения не превосходит 1,57 ц/га, что находится в пределах допустимой погрешности опыта в 2 ц/га. Кроме того, вычисленный массив относительных отклонений (%), диапазон рассеивания и стандартное отклонение для этого массива

$$\delta = [1,41; -3,34; 3,07; -1,19; 1,26; -4,29; 3,87; -1,36; 0,84; -2,68; 3,27; -2,23], \\ -4,29 \dots 3,87, \\ \sigma_\delta = 2,80$$

показывают, что максимальная и средняя относительная погрешность аппроксимации не превосходят соответственно 4,30 и 2,81%, что значительно ниже 5–8%-го порога точности, рекомендуемого [3] при моделировании биологических процессов.

Очевидно, начальный член разложения Фурье функции продуктивности равен 42,56, поэтому её эквивалент – потенциальная продуктивность яровой пшеницы в Ужурском районе оценивается в

$$u_{pot} = 42,56 \frac{t}{2a}$$

Динамика поражения яровой пшеницы септориозом в Ужурском районе в зависимости от временного параметра  $t$  представляется квазипериодической функцией такого же вида, как и для урожайности, поскольку развитие болезни зависит от солнечной активности и от приспособляемости к физиологии растений, то есть к ритму продуктивности яровой пшеницы:

$$s \approx 30,38 - 4,35 \cos 2,24t - 7,05 \sin 2,24t - 2,65 \cos 0,52t - 0,44 \sin 0,52t + 6,24 \cos 1,04t + 3,98 \sin 1,04t + 3,66 \cos 1,49t + 7,34 \sin 1,49t - 0,22 \cos 2,99t + 2,44 \sin 2,99t$$

Относительная погрешность приближения этой функции также невелика и составляет не более 4,34%:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= [0,76; 0,49; 0,02; -0,45; 0,39; -0,08; 0,08; -0,39; 0,45; -0,02; -0,49; 0,76] \\ &\quad -0,76 \dots 0,76, \\ \sigma_\varepsilon &= 0,44, \\ \delta &= [2,24; 1,26; 0,06; -4,33; 1,58; -0,16; 0,28; -1,03; 1,44; -0,07; -1,65; 3,60] \\ &\quad -4,33 \dots 3,60, \\ \sigma_\delta &= 1,97. \end{aligned}$$

Аналогичный подход к представлению динамики высоты растений даёт следующую функцию с оценками качества приближения:

$$\begin{aligned} v \approx & 100,81 + 10,62 \cos 0,52t - 11,40 \sin 0,52t + 1,24 \cos 1,04t - 2,18 \sin 1,04t + 2,87 \cos 1,39t - \\ & - 4,54 \sin 1,39t - 8,40 \cos 2,79t - 3,54 \sin 2,79t - 7,54 \cos 2,51t - 10,73 \sin 2,51t. \\ \varepsilon &= [0,73; -1,00; -0,80; 1,95; -0,30; -2,43; 2,43; 0,30; -1,95; 0,80; 1,00; -1,73] \\ &\quad -2,43 \dots 2,43, \\ \sigma_\varepsilon &= 1,55, \\ \delta &= [0,77; -0,94; -0,85; 2,53; -0,28; -3,13; 2,68; 0,32; -1,84; 0,68; 0,90; -1,55] \\ &\quad -3,13 \dots 2,68, \\ \sigma_\delta &= 1,72. \end{aligned}$$

Эквивалент высоты растений – потенциальная высота растений яровой пшеницы в Ужурском районе также представляется начальным членом разложения в ряд Фурье

$$v_{pot} = 100,81 \text{ см.}$$

Динамика вегетации растений яровой пшеницы в зависимости от временного параметра  $t$  представляется функцией

$$w \approx 88,48 - 0,72 \cos 2,24t + 3,28 \sin 2,24t + 4,62 \cos 0,52t + 0,07 \sin 0,52t + 2,09 \cos 1,04t - 0,107 \sin 1,04t + 2,37 \cos 1,49t - 1,72 \sin 1,49t + 1,67 \cos 2,99t - 2,42 \sin 2,99t$$

и оценками её сглаживающих возможностей посредством абсолютной и относительной погрешностей в пределах 1,28 сут, или 1,47%, которые определены свойствами следующих массивов отклонений и относительных отклонений:

$$\varepsilon = [1,27; 0,83; 0,03; -0,75; 0,66; -0,13; 0,13; -0,66; 0,75; -0,03; -0,83; 1,27] \\ -1,27 \dots 1,27,$$

$$\sigma_{\varepsilon} = 0,75,$$

$$\delta = [1,27; 0,91; 0,04; -0,87; 0,72; -0,17; 0,15; -0,79; 0,87; -0,04; -0,93; 1,46; -1,27 \dots 1,46,$$

$$\sigma_{\delta} = 0,82.$$

Эквивалент вегетации растений – потенциальная продолжительность вегетации растений яровой пшеницы в Ужурском районе по указанному выше принципу, очевидно, равен

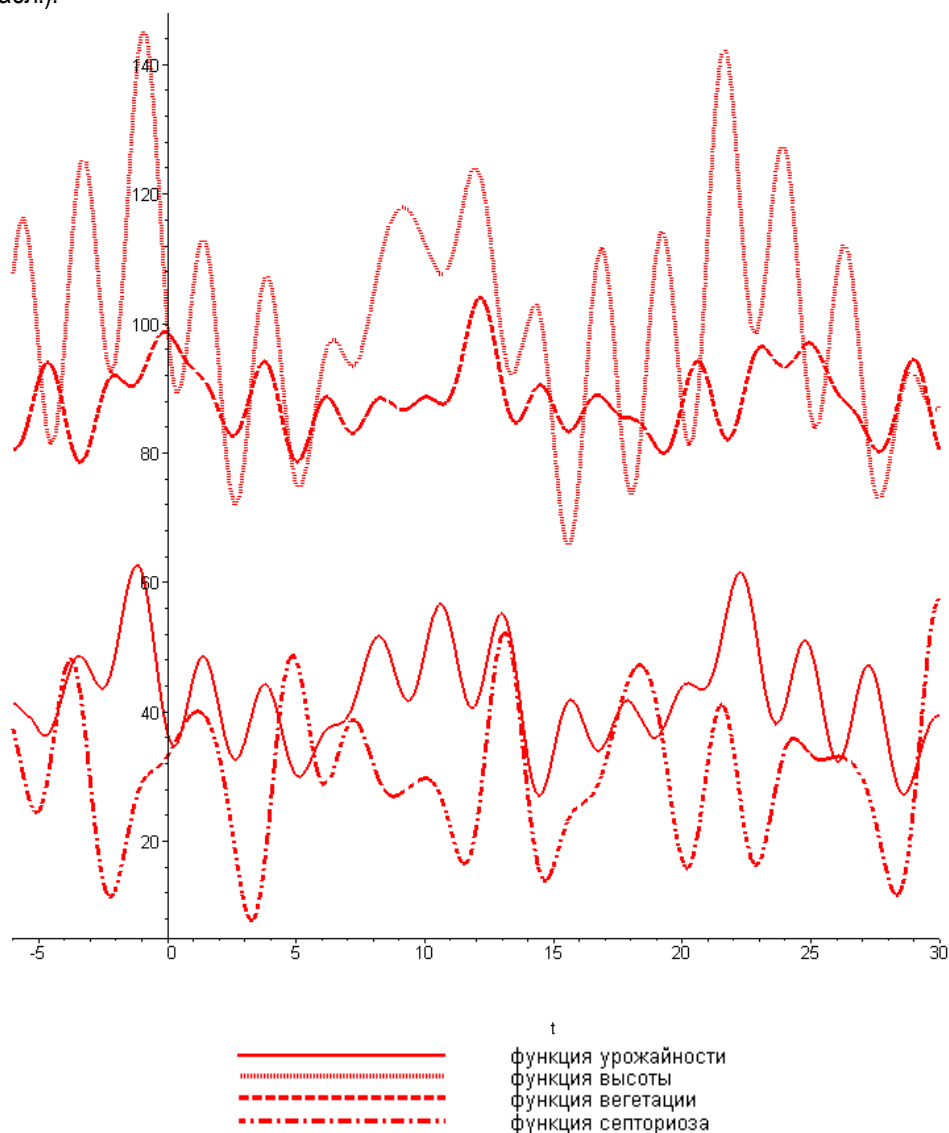
$$w_{pot} = 88,48 \text{ сут.}$$

Таким образом, эквиваленты устойчивых процессов урожайности, высоты и вегетации в Ужурском районе делятся в отношении

$$0,42 : 1,00 : 0,87.$$

Это означает, что в устойчивом продуктивном процессе при изменении высоты растения на 1 см биомасса урожая прирастает на 0,42 ц/га и при этом временные затраты на производство биомассы из фотосинтетически активной энергии составят 0,88 сут. Указанное отношение является необходимым критерием устойчивости системы урожайности и биометрических показателей в Ужурском ГСУ.

Устойчивые продуктивные процессы, описываемые квазипериодическими функциями, могут быть спрогнозированы методом аналитического продолжения с временной области 2000–2011 годов на область 2012–2030 годов (рис., табл.).



Аналитическое продолжение динамики системы урожайности и биометрических показателей яровой пшеницы на Ужурском ГСУ

Аналитический прогноз урожайности яровой пшеницы на 2012–2030 годы на Ужурском ГСУ

Модельный год	Календарный год	Оценка продуктивности	Использование потенциала продуктивности
0	2000	36,72	0,86
1	2001	45,14	1,06
2	2002	40,54	0,95
3	2003	35,28	0,82
4	2004	43,38	1,01
5	2005	30,18	0,70
6	2006	36,33	0,85
7	2007	39,19	0,92
8	2008	51,01	1,19
9	2009	43,91	1,03
10	2010	49,29	1,15
11	2011	52,95	1,24
0	2012	41,24	0,96
1	2013	55,18	1,29
2	2014	32,84	0,77
3	2015	33,82	0,79
4	2016	40,06	0,94
5	2017	34,99	0,82
6	2018	41,57	0,97
7	2019	36,05	0,84
8	2020	43,90	1,03
9	2021	44,04	1,03
10	2022	59,85	1,40
11	2023	48,73	1,14
0	2024	40,90	0,96
1	2025	49,70	1,16
2	2026	32,39	0,76
3	2027	45,81	1,07
4	2028	35,12	0,82
5	2029	30,13	0,70
6	2030	39,44	0,92

Таким образом, колебания урожайности, высоты, вегетации и септориоза имеют общую квазипериодическую природу – подчинены циклам солнечной активности и устойчивы в определённых диапазонах. Этот тезис подтверждён статистическим анализом и моделированием данных по всем сортам яровой пшеницы, возделываемым на ГСУ Красноярского края, Хакасии и Тывы в период с 2000 по 2011 год.

Для зоны лесостепи, в которой расположены экспериментальные поля Дзержинского, Назаровского, Казачинского, Канского, Каратузского, Саянского, Сухобузимского, Ужурского, Уярского ГСУ, как показано

выше, соотношения индексов урожайности  $\left( U, \frac{ц}{га\ см} \right)$  и продолжительности вегетации  $\left( W, \frac{сут}{см} \right)$

имеют вид

$$0,36 : 0,86, \quad 0,44 : 1,03, \quad 0,22 : 0,89, \quad 0,24 : 0,93, \\ 0,26 : 0,98, \quad 0,32 : 0,84, \quad 0,42 : 0,87, \quad 0,25 : 0,98.$$

Следовательно, в лесостепной зоне устойчивый продуктивный процесс характеризуется следующими диапазонами изменений индексов урожайности и продолжительности вегетации:

$$0,22 \leq U \leq 0,44, \quad 0,84 \leq W \leq 1,03.$$

Заметим, что надёжность прогноза по годам убывает: в период с 2012 по 2014 год она снижается с 93,02 по 88,62%, а далее к 2015 году – до 25,46%. Поэтому для увеличения точности и надёжности прогноза рекомендуется ежегодно дополнять статистические ряды урожайности и биометрических показателей данными по окончании уборки урожая и на основании расширенных временных рядов давать улучшенный прогноз на один предстоящий год, а также перспективный прогноз на следующие три года.

### **Выводы**

1. Разработан подход к моделированию системы урожайности и биометрических показателей сортов яровой пшеницы с помощью предложенной квазипериодической модели процессов в полупериоде солнечной активности для зон лесостепи в Красноярском крае.

2. Предложена методика прогнозирования процессов методом аналитического продолжения квазипериодической функции и построения необходимого критерия устойчивости системы урожайности и биометрических показателей, определены биометрические диапазоны устойчивости для зон лесостепи.

### **Литература**

1. *Berry B.L.* Regularities of natural cycles, prediction of climate and surface conditions // *Hydrol. Process.* – 1998. – 12. – P. 2267–2278.
2. *Berry B.L.* Solar system oscillations and models of natural processes // *Journal of Geodynamics*, 41. – 2006. – Issues 1-3. – P. 133–139.
3. *Carrington R.C.* Observations of the Spots of the Sun, London, Williams and Norgate, 1863. – P. 16.

