



## Метрологическое обеспечение полевого опыта с применением имитационных моделей

*Г.М. Мучкаева, Н.С. Лиджиева, В.В. Кирилаев, Г.Е. Эрдниева, В.В. Самойлов*

*Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, Элиста*

**Аннотация:** в работе предложен методический подход к метрологической обработке данных полевого опыта с применением имитационных моделей при выращивании зерновых культур, позволяющий оптимизировать параметры технологии и получить значения на достоверном уровне. Приведён пример метрологической обработки многофакторного полевого опыта.

**Ключевые слова:** полевой опыт, наблюдение, оптимизация технологии, имитационная модель, регрессия, корреляционная связь, коэффициент корреляции.

Полевой опыт проводится как результат научного исследования, показывает оценку разработанных технологий возделывания культурных растений с агротехнических и экономических позиций. Наблюдения и эксперименты являются общепринятыми приёмами научного исследования и проводятся с помощью совершенных измерительных средств.

Существует модель зерновых культур, спроектированная Ю.П. Добрачёвым, позволяющая разработать оптимальные параметры технологии возделывания зерновых культур. Данной моделью предусматривается возможность определения питания, используются структура посева и условия образования структурных составляющих валового сбора и изучение воздействия водного компонента на процессы морфогенеза [1].

Имитационная модель продуктивности агроценоза включает основные блоки – метеорологический, почвенный и биологический. Первые два блока выполняют учет воздействия факторов экологического характера на радиационный и температурный фон надземной части растений и почвенного слоя, параметры почвенной влажности в зоне, занятой корневыми образованиями.



Биологический блок описывает реакции посева на условия произрастания. Количество проростков на единицу занимаемой площади находится по зависимости:

$$n = N_S \cdot N_K \cdot F_K \cdot \varphi(\eta, T^{max}, d_r), \quad (1)$$

где  $N_S$  - количество продуктивных стеблей;  $N_K$  - количество колосков в колосе;  $F_K$  - количество цветков в колоске;  $\varphi(\eta, T^{max}, d_r)$  - фактор озернённости;  $\eta$  - индекс, характеризующий процесс спорогенеза;  $T^{max}$  - наибольшая температура в период максимальной активности растения;  $d_r$  - количество суток за период максимальной активности растения, сопровождающихся осадками.

Изменение структурных составляющих валового сбора показано системой уравнений с задаванием определённых условий [2]. Кущение задаётся зависимостью:

$$S^{i+1} = \begin{cases} S^i + k_{S1} \cdot Ph^i \cdot F_W^i \cdot \Delta\tau; & \text{при } S^i < S^*; \\ S^i & \text{при } S^i \geq S^*, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S^i$  - количество продуктивных стеблей на  $i$ -е сутки на единице площади;  $k_{S1}$  - коэффициент, показывающий число единиц одной величины, приходящейся на единицу другой;  $Ph^i$  - продуктивность посева, задаваемая углеводными эквивалентами на  $i$ -е сутки;  $F_W^i$  - функция, определяющая водный статус растений и принимающая нулевое значение при влажности завядания и значение, равное единице при почвенной влажности выше влажности завядания;  $S^*$  - потенциально возможное количество стеблей в посеве, шт./м<sup>2</sup>.

Количество колосков в колосе определяется по формуле:



$$N_k = \frac{k_k^* \cdot j_k}{k_k + j_k}, \quad (3)$$

где  $N_k$  - количество колосков в колосе;  $k_k^*$  - максимальное количество колосков в колосе;  $k_k$  - коэффициент, численно равный параметру  $j_k$ , при котором образуется половина наибольшего количества бугорков.

Параметры выше представленных уравнений определяли по значениям наблюдений зависимости структурных составляющих урожая от природно-климатических условий на протяжении нескольких лет.

Анализ результатов моделирования показал, что модель в достаточной степени реагирует на изменения условий периода развития растений, что было показано при прогнозировании продуктивности яровой пшеницы в Республике Калмыкия. Ошибка прогноза не превысила 5% [3].

Модель проходила адаптацию для конкретного сорта яровой пшеницы. Коэффициенты адаптирования определяли как результаты ряда численных экспериментов на основе значений полевых опытов. На начальной стадии комплекс значений включал данные погодных условий, составляющие почвенных характеристик, параметры технологические [4]. Результаты ряда численных экспериментов по выполнению процесса адаптации модели [5, 6] показаны на рис. 1. Сценарные исследования реализовывались на базе численных экспериментов посредством задания данных нескольких лет, различных значений поливных норм, дат назначения поливов. Результаты расчетов для яровой пшеницы представлены в таблице 1.

Связь урожайности и удобрений описывается уравнением, позволяющим определить зависимость от оросительной нормы. Для яровой пшеницы размеры прироста урожайности (в ц/га) от оросительной нормы и дозы минеральных удобрений будет иметь вид:

$$\Delta Y = 16 + 4,4q + \frac{[45 + 22,5q/(0,6 + q)] \cdot Q}{960 + Q}, \quad (4)$$

где  $q$  – доза вносимых под посев удобрений, выраженная в долях от полной нормы.

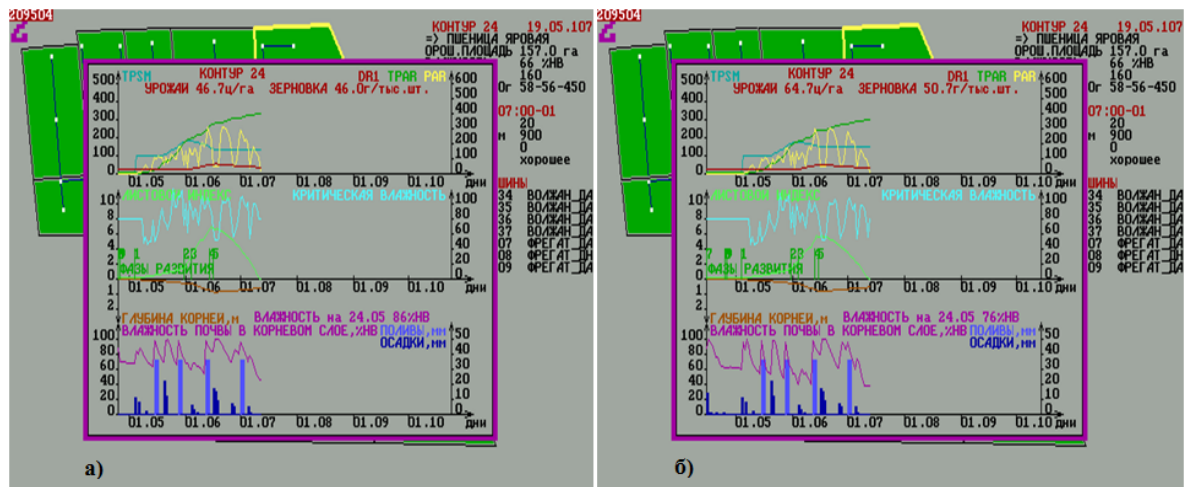


Рис. 1. – Численный эксперимент по формированию урожая яровой пшеницы в 2002 г.: а) без удобрений; б) при  $N_{210}P_{70}$

Таблица №1

Урожайность яровой пшеницы, принятая в сценарных исследованиях

Оросительная норма, $m^3/га$	Варианты по минеральному питанию	Фактические годы		Гипотетические годы		Среднее
		2002	2003	1	2	
0	без удобрений	15,3	10,5	20,5	16,9	15,8
	с удобрениями	19,3	16,8	21,9	22,0	20,0
400	без удобрений	27,9	25,3	31,2	30,8	28,8
	с удобрениями	35,1	33,9	43,0	36,0	37,0
800	без удобрений	35,0	32,8	37,9	38,7	36,1
	с удобрениями	46,3	44,5	49,2	47,6	46,9
1200	без удобрений	39,8	37,1	45,7	43,0	41,4
	с удобрениями	52,0	50,9	57,0	54,1	53,5
1600	без удобрений	42,9	42,0	46,6	44,5	44,0
	с удобрениями	59,1	54,8	58,9	55,7	57,1
2000	без удобрений	45,3	40,1	50,4	49,4	46,3
	с удобрениями	59,2	56,7	63,8	60,7	60,1

Оптимизационная задача ресурсберегающей технологии выражается в виде:

$$\left\{ a + vq + \frac{[k_1 + k_2q / (K_2 + q)] \cdot Q_n}{K_1 + Q_n} \right\} \cdot Z_Y - Z_W Q_0 - Z_{NP} q - Z_C \cdot Y^{1,2} - A \rightarrow \max, \quad (5)$$



где  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $k_2$ ,  $k_1$ ,  $a$ ,  $b$ , – коэффициенты, характеризующие сорт;  $Z_Y$  – стоимость тонны зерна;  $Q_n$ ,  $Q_b$  – оросительная норма нетто и брутто,  $m^3/га$ ;  $Z_W$  – стоимость доставки (и полива)  $1 m^3$  оросительной воды на поле,  $Z_{NP}$  – стоимость полной дозы удобрений,  $Z_C$  – стоимость уборки 1 тонны дополнительной части валового сбора и потери,  $A$  – ежегодные амортизационные отчисления.

В результате выполнения оптимизационных задач определены параметры ресурсосберегающей технологии: доза удобрений  $N_{210}P_{70}$ ; оросительная норма–  $1800 m^3/га$ .

В исследованиях полевых опытов применение точных функциональных связей, при которых определённому значению заданного параметра отвечает строго предопределённое значение другого параметра, имеет редкий характер. Наиболее часто имеют место зависимости между определёнными переменными, когда заданному значению признака  $X$  отвечает множество вероятных значений признака  $Y$ , по-другому это явление называется распределением [7]. Связи такого характера называются корреляционными. Здесь главные вопросы, отражающие характер корреляционной связи, – это теснота и форма связи. Для определения данных показателей возможно применение статистических методов, в частности корреляции и регрессии [8].

Регрессия даёт наглядное представление объёмов изменения эффективного признака  $Y$  при установленном изменении одного или нескольких факториальных признаков [9]. В таком случае зависимость между функцией и аргументом задаётся корреляционным уравнением или уравнением регрессии [10]. Так, уровень урожайности яровой пшеницы имеет более тесную корреляционную связь с числом колосков в колосе, количеством зёрен и массой зерна в колосе.

---



Установлена закономерность увеличения продуктивности яровой пшеницы:

- при увеличении количества колосков в колосе:  $Y = + 9,63 + 0,13 X$ , где:  $Y$  – урожайность пшеницы, ц/га;  $X$  – количество колосков в колосе, штук.

Здесь отмечен высокий уровень корреляционной зависимости между урожайностью и количеством колосков в колосе, на что указывает коэффициент корреляции  $r = 0,98$ ;

- при увеличении числа зёрен в колосе описывается уравнением прямолинейной регрессии:  $Y = - 2,73 + 0,78 X$ , где:  $Y$  – урожайность пшеницы, ц/га;  $X$  – количество зёрен в колосе, штук.

Коэффициент корреляции между урожайностью и количеством зёрен в колосе для яровой пшеницы оказался на уровне  $0,97$ ;

- тесная корреляционная связь была отмечена между урожайностью и массой зерна в колосе ( $r = 0,97$ ), а закономерность изменения урожайности описывается зависимостью:  $Y = - 0,16 + 0,03 X$ , где:  $Y$  – урожайность пшеницы, ц/га;  $X$  – масса зерна одного колоса, г.

Таким образом, метрологическую обработку многофакторного полевого опыта с применением имитационных моделей производят на основе выявления корреляционных связей, тесноту и форму которых задают уравнением регрессии или корреляционным уравнением, что позволяет получать достоверные решения.

### Литература

1. Добрачев Ю.П., Булатова В.В. Динамическая модель зерновых культур, учитывающая структуру урожая // Сб. Цитогенетический и математический подходы к изучению биосистем. М., 1986, С. 140-142.

2. Добрачев Ю.П., Живлов А.И., Ильина Т.А. Перспективы использования имитационного моделирования для оценки продуктивности сельскохозяйственных культур // М.: ВНИИТЭИСХ, 1984. С. 32-35.

---



3. Мучкаева, Г.М., Шалбурова А.Б., Манджиев Д.Б., Бадмаев Б.С., Нохашкиев П.Э. Преимущества энергосберегающих технологий и пути снижения энергозатрат при воздействии сельскохозяйственных культур // Вестник Калмыцкого университета. 2014. №3(23). С. 51-54.

4. Добрачѐв, Ю.П., Мучкаева Г.М. Методические подходы к созданию ресурсосберегающей технологии выращивания зерновых культур при орошении // Сб. научных трудов. М.: Изд. ВНИИА, 2004. С. 78-83.

5. Суханов Г.Н., Мучкаева Г.М. Экономические аспекты планирования интенсивности технологии выращивания зерновых культур на орошаемых землях // Мат-лы Междунар. науч.- пр. конф. «Техническое обеспечение орошаемого земледелия в АПК». Коломна: ФГНУ ВНИИ «Радуга», 2005. С. 166-169.

6. Шушкевич Т. В. Программный расчет неопределенности результатов измерений // Инженерный вестник Дона, 2016, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/).

7. Целигоров Н.А., Целигорова Е.Н., Мафура Г.В. Математические модели неопределѐнностей систем управления и методы, используемые для их исследования // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/).

8. Брюханов В.А. Показатели точности измерений // Советник метролога. 2011. №1. С. 15-19.

9. Mandelshtam S. M. Metrological support to data-capture and processing suites and computer-aided experiment systems // Measurement Techniques. 1978. pp. 899-902.

10. Krichevets A. M., Kalitsinskii Yu. R. Fundamental problems in the metrological assurance of modern information-processing measurement systems // Measurement Techniques. 1995. pp. 1324-1326.

---



## References

1. Dobrachev Ju.P., Bulatova V.V. Dinamicheskaja model' zernovyh kul'tur, uchityvajushhaja strukturu urozhaja. Sb. Citogeneticheskij i matematicheskij podhody k izucheniju biosistem [The dynamic model of grain crop, considering the structure of the crop]. M., 1986, pp. 140-142.
  2. Dobrachev Ju.P., Zhivlov A.I., Il'ina T.A. Perspektivy ispol'zovanija imitacionnogo modelirovanija dlja ocenki produktivnosti sel'skohozjajstvennyh kul'tur [Prospects for the use of simulation to evaluate the productivity of agricultural crops]. M.: VNIITJeISH, 1984. pp. 32-35.
  3. Muchkaeva G.M., Shalburova A.B., Mandzhiev D.B., Badmaev B.S., Nohashkiev P.Je. Vestnik Kalmyckogo universiteta, 2014. №3 (23). pp. 51-54.
  4. Dobrachjov Ju.P., Muchkaeva G.M. Metodicheskie podhody k sozdaniju resursosberegajushhej tehnologii vyrashhivaniya zernovyh kul'tur pri oroshenii. Sb. nauchnyh trudov [Methodical approaches to creation of resource-saving technologies of cultivation of grain crops under irrigation]. M.: Izd. VNIIA, 2004. S. 78-83.
  5. Suhanov G.N., Muchkaeva G.M. Mat-ly Mezhdunar. nauch. - pr. konf. «Tehnicheskoe obespechenie oroshaemogo zemledelija v APK» [Proceedings of The Intern. sc.-pr. conference "Technical support of irrigated agriculture in agriculture"]. Kolomna: FGNU VNII «Raduga», 2005. pp. 166-169.
  6. Shushkevich T.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/).
  7. Celigorov N.A., Celigorova E.N., Mafura G.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/).
  8. Brjuhanov V.A. Sovetnik metrologa. 2011. №1. pp. 15-19.
  9. Mandelstam S. M. Measurement Techniques. 1978. pp. 899-902.
  10. Krichevets A. M., Kalitsinskii Yu. R. Measurement Techniques. 1995. pp. 1324-1326.
-