

Оригинальная статья / Original article

УДК 631.51; 631.8

DOI: 10.18470/1992-1098-2022-1-119-127

Углубленная адаптация технологии возделывания озимой пшеницы в Центрально-Чернозёмном регионе

Иван И. Гуреев, Людмила Б. Нитченко, Иван А. Прущик

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Курский федеральный аграрный научный центр»,
Курск, Россия**Контактное лицо**

Иван И. Гуреев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией севооборотов и адаптивных агротехнологий, ФГБНУ «Курский ФАНЦ»; 305021 Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 70б.
Тел. +79103103908

Email gureev06@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>**Формат цитирования**

Гуреев И.И., Нитченко Л.Б., Прущик И.А. Углубленная адаптация технологии возделывания озимой пшеницы в Центрально-Чернозёмном регионе // Юг России: экология, развитие. 2022. Т.17, N 1. С. 119-127. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-1-119-127

Получена 19 февраля 2021 г.

Прошла рецензирование 26 июля 2021 г.

Принята 6 сентября 2021 г.

Резюме

Цель. На основе углубленной адаптации технологии возделывания озимой пшеницы определить способ обработки почвы и дозу *NPK*, обеспечивающие минимальную себестоимость производства зерна культуры требуемого качества в условиях Центрально-Чернозёмного региона (ЦЧР).

Материалы и методы. Эффективность производства озимой пшеницы во многом зависит от адаптации технологии её возделывания к почвенно-климатическим условиям, которые идентифицируются на уровне агроэкологической провинции. Но основной объект систем земледелия – почвенный покров внутри агроэкологической провинции – отличается высокой территориальной пестротой по плодородию, что не учитывается при разработке агротехнологий и понижает уровень их адаптивности. Поэтому предложено минимизировать использование ресурсов в интенсивных технологиях за счёт углубленной адаптации обработки почвы и удобрения в соответствии с исходным состоянием почвы конкретного поля.

Результаты. Установлено, что для условий ЦЧР оптимальными значениями факторов являются доза $N_{19}P_{39}K_{39}$ и комбинированный способ обработки почвы под озимую пшеницу, которым соответствует минимальная себестоимость зерна 5,38 тыс. руб./т при урожайности 3,38 т/га и содержании белка в зерне 3-его класса 12%.

Заключение. В условиях земледельческих задач, когда между факторами имеется взаимодействие, эффективность углубленной адаптации возрастает при комплексной оптимизации факторов по инновационной методологии с использованием математического способа неопределённых множителей Лагранжа. Комплексная оптимизация факторов позволила определить способ обработки почвы и дозу удобрения, обеспечивающие минимальную себестоимость производства зерна культуры заданного качества в условиях ЦЧР.

Ключевые слова

Углубленная адаптация, озимая пшеница, обработка почвы, минеральное удобрение, оптимизация факторов.

In-depth adaptation of winter wheat cultivation technology in the Central Chernozem region

Ivan I. Gureev, Lyudmila B. Nitchenko and Ivan A. Prushcik

Federal Agricultural Kursk Research Center, Kursk, Russia

Principal contact

Ivan I. Gureev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Crop Rotation and Adaptive Agricultural Technologies, Federal Agricultural Kursk Research Center; 70b Karl Marx St, Kursk, Russia 305021.

Tel +79103103908

Email gureev06@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>

How to cite this article

Gureev I.I., Nitchenko L.B., Prushcik I.A. In-depth adaptation of winter wheat cultivation technology in the Central Chernozem region. *South of Russia: ecology, development*. 2022, vol. 17, no. 1, pp. 119-127. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2022-1-119-127

Received 19 February 2021

Revised 26 July 2021

Accepted 6 September 2021

Abstract

Aim. The purpose of the research is to determine the method of soil cultivation and the dose of NPK, based on in-depth adaptation of winter wheat cultivation technology, ensuring the minimum cost of producing grain of the crop of the required quality in the Central Black Earth Region (CBER).

Materials and Methods. The efficiency of winter wheat production largely depends on the adaptation of the technology of its cultivation to soil and climatic conditions, which are identified at the level of the agroecological province. But the main object of farming systems - the soil cover within the agroecological province is distinguished by a high territorial diversity in fertility, which is not taken into account when developing agricultural technologies and thus lowers the level of their adaptability. Therefore, it is proposed to minimize the use of resources in intensive technologies due to in-depth adaptation of tillage and fertilization in accordance with the initial state of the soil of a particular field.

Results. It was found that for the conditions of the CBER, the optimal values of the factors are the dose $N_{19}P_{39}K_{39}$ and the combined method of tillage for winter wheat, which correspond to the minimum cost of grain of 5.38 thousand roubles/t with a yield of 3.38 t/ha and a 12% protein content in grain of 3rd class.

Conclusion. In addressing agricultural problems when there is an interaction between the factors, the effectiveness of in-depth adaptation increases with the complex optimisation of factors according to innovative methodology using the mathematical method of indefinite Lagrange multipliers. Comprehensive optimisation of the factors made it possible to determine the method of tillage and the dose of fertiliser that would ensure the minimum cost of producing grain of a given quality under the conditions of the CBER.

Key Words

In-depth adaptation, winter wheat, tillage, mineral fertilisation, optimisation of factors.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение России достаточным количеством зерна является гарантией продовольственной безопасности государства. Благоприятные почвенно-климатические условия для ведения зернового хозяйства имеет Центрально-Чернозёмный регион (ЦЧР), который располагает 8,2% пашни Российской Федерации и производит примерно 11,7% зерна.

Ведущее место в общем балансе производимого зерна в ЦЧР занимает озимая пшеница. Посевные площади культуры в регионе превышают 40% площадей всех зерновых, а её доля в валовом сборе достигает 55%. Чернозёмные почвы региона способствуют получению высоких урожаев качественного зерна.

Озимая пшеница широко используется в производстве продуктов питания, кормов сельскохозяйственных животных, а также в качестве промышленного сырья. Её зерно богато белками и другими ценными веществами, которое применяется для производства высококачественных хлебобулочных изделий, макарон и других продуктов. Пшеничные отруби – концентрированный корм всех видов животных. Измельчённую солому в запаренном виде или сдобренную химическими веществами охотно поедает крупный рогатый скот и овцы.

Производство зерна в настоящее время ориентировано на возрастающий уровень интенсификации.

Перспектива развития данного направления во многом определяется новыми требованиями, связанными как с ростом экономических показателей, так и обострением экологических проблем, решение которых обусловлено необходимостью применения инновационных агротехнологий.

Эффективность производства озимой пшеницы во многом зависит от адаптации (соответствия) технологии её возделывания почвенно-климатическим условиям, любые нарушения которого чреваты дополнительными безвозвратными потерями энергии и, как следствие, повышением себестоимости и снижением качества продукции. Адаптация технологии позволяет повысить урожайность культуры и снизить затраты на её производство за счёт рационального использования ресурсов почвы и соответствия агротехнических приёмов биологическим особенностям растений.

Хронология развития систем земледелия и, соответственно, технологий производства зерновых культур, свидетельствует о нарастающем с течением времени уровне их адаптации к природно-ресурсному потенциалу. Каждый последующий этап адаптации характеризовался ростом продуктивности и экологической безопасности ведения земледельческой отрасли (табл. 1).

Таблица 1. Хронология адаптации систем земледелия к ландшафту

Table 1. Chronology of adaptation of farming systems to the landscape

Этапы формирования систем земледелия Stages of the formation of farming systems	Содержание этапов Content of stages
60-е годы XX века. Система Мальцева Т.С., почвозащитная система Бараева А.И. 60s of the twentieth century System Maltseva T.S., soil protection system Baraeva A.I.	Впервые выделены экологически ориентированные системы земледелия For the first time, ecologically oriented farming systems are identified
80-е годы XX века Зональные системы земледелия 80s of the 20 th century Zonal farming systems	Ориентированы территориально на применение в области, крае или автономной республике Geographically oriented towards application in the region, territory or autonomous republic
90-е годы XX века Ландшафтные системы земледелия адаптированы к агроэкологической провинции 90s of the 20 th century Landscaping farming systems are adapted to the agro-ecological province	Ориентированы на применение в зоне, характеризующейся особенностью почвенного покрова связанного с микроклиматом Oriented for use in an area characterized by the peculiarity of the soil cover associated with the microclimate
Предлагаются Ландшафтные системы земледелия углубленной адаптации Proposed Advanced adaptation landscape farming systems	Адаптированы к множеству сочетаний показателей исходных свойств почвы внутри агроэкологической провинции Adapted to many combinations of indices of initial soil properties within an agro-ecological province

Огромная территория нашей страны отличается многообразием условий произрастания культур, предопределяющих значимые различия в сельскохозяйственном использовании земель. Для адаптации технологий к вариабельным условиям наукой и практикой проведено объёмное изучение особенностей почвенного покрова России, рельефа, климата, погоды, гидрологического и теплового

режимов. На основе полученных знаний выполнена ландшафтно-сельскохозяйственная типизация территории, в результате чего природно-географические объекты поделены на земледельческие зоны, привязанные к административному делению страны на республики, края, области и районы.

В свою очередь выделенные зоны разбиты на подзоны, позволяющие идентифицировать почвенно-климатические условия на уровне агроэкологической провинции. Сходство подзон различных административно-территориальных единиц позволило разработать для расположенных на них хозяйств аналогичных систем земледелия [1]. Но основной объект систем земледелия – почвенный покров внутри выделенных подзон – отличается высокой территориальной пестротой по плодородию, что не учитывается при разработке агротехнологий и понижает уровень их адаптивности.

С развитием цифровых технологий и многофункциональной сельскохозяйственной техники возможности дальнейшей адаптации земледельческой отрасли существенно расширились. Появилась возможность оперативно принимать решения по управлению производственным процессом сельскохозяйственных культур с учётом обширной информации о вариативности среды обитания растений внутри агроэкологической провинции. Из этого следует, что наиболее кардинальным путём совершенствования систем земледелия является углубленная адаптация агротехнологий к условиям произрастания, сужающаяся от объёмной агроэкологической провинции до конкретного поля внутри неё [2] (табл. 1).

Урожаи культур формируются преимущественно через плодородие почвы, поэтому углубленная адаптация должна быть ориентирована, прежде всего, на информацию о вариативности плодородия, к которому дифференцированно применяют варианты адаптивных технологий. Каждому из возможных уровней плодородия должен соответствовать свой адаптивный вариант механизированной технологии, оснащённой соответствующей техникой и другими ресурсами. Из обширного массива возможных вариантов исходного состояния почвы после предшественников различной степени благоприятности группируют основные, выраженные с учётом взаимосвязи функций обработки почвы при её исполнении [3].

Углубленная адаптация реализуется в соответствии с принципами экономико-экологической эффективности через элементы адаптивного варианта технологии [2], важнейшими из которых являются обработка почвы и удобрение.

Обработка почвы – многофункциональный агротехнический приём, обладающий способностью регулирования плотности почвы и режима питания растений, уничтожения сорняков, вредителей и болезней сельскохозяйственных культур. Значимость обработки усиливается ещё и тем, что в технологиях она первая в исполнении и по содержанию собственных свойств оказывает влияние на последующие приёмы и насыщенность технологий ресурсами. От выбора способа обработки во многом зависит состав технологии, затраты ресурсов на её исполнение и экологические последствия в виде уплотнения почвы движителями машинотракторных агрегатов и загрязнения окружающей среды выхлопными газами [4].

Интенсивность адаптивной обработки зависит от исходного состояния почвы. Принцип углубленной адаптации состоит в минимизации интенсивности обработки в допустимых пределах, что позволяет экономно расходовать ресурсы и оказывать щадящее воздействие на окружающую среду [5].

Другим значимым элементом технологии является удобрение, без которого немислима интенсификация производства сельскохозяйственных культур. Удобрение является мощным рычагом управления продуктивностью растений при одновременном снижении потерь питательных веществ почвой [6].

Урожай культур формируется, прежде всего, за счёт фитоценоза, являющегося не только биологической категорией, но и агрономической. Примерно 95% массы сухого органического вещества урожая создаётся фотосинтезом. Элементы же минерального питания, составляя лишь около 5% сухой массы, служат средством формирования фотосинтетического аппарата, а также его адаптации к вариативному радиационному режиму и, в конечном счёте, повышают КПД фотосинтетической активной радиации (ФАР).

Удобрение дорогостоящий и экологически небезопасный ресурс, загрязняющий почву при избыточном внесении. Дефицит его, так же как и избыток, негативно сказывается на урожайности и качестве растениеводческой продукции [7; 8]. Повышению эффективности удобрения способствует сбалансированное его внесение в соответствии с потребностью растений [9].

Цель исследований – на основе углубленной адаптации технологии возделывания озимой пшеницы определить способ обработки почвы и дозу *НРК*, обеспечивающие минимальную себестоимость производства зерна культуры требуемого качества в условиях ЦЧР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность углубленной адаптации факторов обработки почвы и удобрения возрастает при их оптимизации. Учитывая взаимосвязанное влияние данных факторов на урожайность и экономические показатели, оптимизация должна быть комплексной.

Методология такой оптимизации разработана с использованием метода неопределённых множителей Лагранжа, который позволяет на основе математического моделирования определять стационарные точки функции параметра оптимизации, когда между факторами имеется взаимодействие, характерное для решения земледельческих задач [10]. Помимо повышенной точности оптимизации, подобное моделирование позволяет выявить синергию факторов в исследуемых технологических процессах [11]. Используя инновационную методологию, провели комплексную оптимизацию факторов обработки почвы и удобрения в технологии возделывания озимой пшеницы.

Экспериментальные исследования выполнили в 2016–2020 гг. в стационарном многофакторном полевом опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (ЦЧР, Медвенский район Курской области). Опытный

участок расположен на склоне северной экспозиции в зернотравянопаропашном севообороте. Почва – чернозём типичный тяжелосуглинистый слабосмытый с содержанием гумуса 5,1%, $pH_{KCl} = 5,7$, щёлочногидролизуемого азота – 18, подвижного фосфора – 9,3 и обменного калия – 8,8 мг на 100 г почвы.

Изучали влияние факторов дозы удобрения и способов обработки почвы на урожайность зерна озимой пшеницы, содержание в нём белка и себестоимость производимой продукции.

Доза удобрения – фактор количественный, уровням его варьирования в опыте соответствовала числовая шкала: без удобрений, $N_{20}P_{40}K_{40}$ и $N_{40}P_{80}K_{80}$. Способы основной обработки почвы (отвальная, комбинированная и безотвальная) – фактор качественный. Отвальную и безотвальную обработку проводили на глубину 20-22 см, комбинированная обработка включала в себя отвальную на глубину 20-22 см + поверхностную обработку на глубину 8-10 см.

Качественные факторы или количественные, трактуемые как качественные, исследуются дисперсионным анализом. Их оптимизация возможна выделением лучших уровней, количество которых ограничивается условиями опыта. К примеру, в задаче из трёх уровней фактора оптимизацией можно выделить один оптимальный уровень. Но такая оптимизация грубая, так как не учитывает взаимодействие факторов. Кроме того, для количественных факторов, трактуемых как качественные, не учитываются возможные оптимальные значения в промежутке между исследуемыми уровнями.

Таблица 2. Уровни варьируемых факторов

Table 2. Levels of variable factors

Фактор Factor	Обозначение Designation	Уровни варьирования: кодовые Variation levels: code		
		-1	0	1
		Натуральные / Natural		
Доза удобрения Fertilizer dose	X_1	0	$N_{20}P_{40}K_{40}$	$N_{40}P_{80}K_{80}$
Способ обработки почвы Tillage method	X_2	Отвальная Tillage	Комбинированная Combined	Безотвальная No-till

Качественные факторы также кодировали. Но учитывая дискретность, анализ полиномиальной модели проводили только на каком-то одном из значений.

Наиболее простые из планов второго порядка – ортогональные. Преимущество их состоит в том, что коэффициенты уравнения регрессии и их дисперсии оцениваются независимо, следствием чего является резкое сокращение объёма вычислительных работ. Поэтому факторы с незначимыми коэффициентами отбрасываются без пересчёта оставшихся значимых коэффициентов. Всё это позволяет упростить расчёты и снизить ошибки при выполнении исследований [12].

Используя центральный ортогональный композиционный план, составили матрицу

Подобные задачи более успешно решаются использованием регрессионных моделей, получаемых статистическими методами планирования и анализа эксперимента, когда исследуется поведение результирующего признака функции при определённом изменении одного или нескольких факторов. Связь между функцией и факторами выражается уравнениями регрессии в виде полиномов, являющихся рядами Тейлора, коэффициенты которых получают разложением неизвестной функции в окрестностях некоторой точки многофакторного пространства.

Земледельческие задачи достаточно сложные и очень часто исследуемые процессы невозможно описать полиномами первого порядка вследствие их неадекватности. В таких случаях используют полиномы второго или более высокого порядка. В планах экспериментов для описания процессов полиномами второго порядка факторы варьируют не менее чем на трёх уровнях, и должно выполняться условие получения отдельных оценок всех коэффициентов полиномиальных уравнений.

С целью использования стандартных планов эксперимента натуральные значения факторов кодировали, после чего их уровни приняли значения (-1) и (+1). Нулевым уровнем являлся центр интервала, в котором проводился эксперимент. Кодирование факторов облегчает расчёты, так как их уровни в относительных единицах не зависят от физической природы и интервалов варьирования (табл. 2).

планирования эксперимента, которую реализовали для урожайности зерна культуры, содержания белка в нём и себестоимости производимой продукции (табл. 3).

Изменения выходной величины носят случайный характер. Поэтому во избежание систематических ошибок опыты проводили в случайном порядке и повторяли трижды. Статистическую значимость коэффициентов уравнений регрессии оценивали по t -критерию Стьюдента. Воспроизводимость эксперимента устанавливали по критерию Кохрена. Адекватность описания исследуемого процесса полиномом второй степени оценивали с использованием F -критерия Фишера.

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента
Table 3. Experiment planning matrix

№ опыта No.	Уровни варьирования факторов Factor variation levels		Урожайность зерна, т/га Grain yield, t/ha		Содержание белка в зерне, % Protein content in grain, %		Себестоимость производимой продукции, тыс. руб./т Cost of manufactured products, thousand rubles/t							
	X ₁	X ₂	повторения repetitions	среднее average	повторения repetitions	среднее average	повторения repetitions	среднее average						
1	1	1	3,43	4,34	4,35	4,04	11,7	11,3	14,9	12,6	6,54	5,22	5,2	5,65
2	1	-1	3,7	4,17	4,62	4,16	12,4	11,7	14,9	13,0	6,57	5,7	5,35	5,87
3	-1	1	1,83	2,55	2,22	2,20	10,3	10,5	14,5	11,8	7,28	5,25	6,22	6,25
4	-1	-1	2,59	2,9	2,47	2,65	11,4	10,7	11,8	11,3	5,87	5,38	6,12	5,79
5	1	0	3,12	4,4	4,4	3,97	11	11,7	15	12,6	7,04	5,05	5,05	5,71
6	-1	0	1,95	2,52	2,27	2,25	10,6	10,6	11	10,7	6,95	5,34	5,9	6,06
7	0	1	3,06	3,06	3,97	3,36	10,8	10,6	14,8	12,1	5,9	5,9	4,62	5,47
8	0	-1	3,17	4,18	3,58	3,64	11,8	11,3	14,5	12,5	6,28	4,72	5,45	5,48
9	0	0	2,89	3,54	3,92	3,45	10,8	11,1	14,9	12,3	6,3	5,12	4,5	5,31

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После обработки экспериментальных данных получили адекватные нелинейные уравнения регрессии (1) урожайности зерна озимой пшеницы, себестоимости его производства и содержания в нём белка, зависимость от дозы удобрений и способа обработки почвы:

$$Y_{\text{п}} = 3,41 + 0,85X_1 - 0,14X_2 + 0,08X_1X_2 - 0,27X_1^2 + 0,12X_2^2, \frac{\text{т}}{\text{га}};$$

$$C = 5,38 - 0,14X_1 - 0,17X_1X_2 + 0,47X_1^2, \frac{\text{тыс. руб.}}{\text{т}};$$

$$B = 12,0 + 0,73X_1 - 0,06X_2 + 0,21X_1X_2, \%$$
(1)

где $Y_{\text{п}}$ – урожайность зерна озимой пшеницы, т/га;

C – себестоимость производства зерна, тыс. руб./т;

B – содержание белка в зерне, % (согласно ГОСТ 9353-2016, у пшеницы 3-его класса массовая доля белка, в пересчёте на сухое вещество, должна быть не менее $B=12\%$).

В соответствии с целью исследований параметром оптимизации является себестоимость производимой продукции, которую необходимо минимизировать. Оптимизацию проводили инновационным методом – применением математического способа неопределённых множителей Лагранжа, в соответствии с которым условие для определения экстремальных значений параметра оптимизации представлено в виде [1]:

$$\frac{dC}{dX_1} + \lambda \frac{dB}{dX_1} = 0;$$

$$\frac{dC}{dX_2} + \lambda \frac{dB}{dX_2} = 0;$$

$$\varphi = \varphi(B, X_1, X_2) = 0; \quad \text{где}$$

λ – множитель Лагранжа. В физических задачах он постоянен и не несёт информационной ценности, но определение его значительно проще, чем исключение неизвестной через уравнение связи;

φ – уравнение содержания белка в зерне, используемое в качестве связи (2):

$$\varphi = B - 12,0 - 0,73X_1 + 0,06X_2 - 0,21X_1X_2 = 0, \%$$
(2)

После преобразований получили систему трёх уравнений (3), отвечающую условию стационарности функции себестоимости производства зерна:

$$-0,14 + 0,94X_1 - 0,17X_2 + \lambda(0,73 - 0,21X_2) = 0;$$

$$0,17X_1 + \lambda(0,06 + 0,21X_1) = 0;$$
(3)

$$\varphi = B - 12,0 - 0,73X_1 + 0,06X_2 - 0,21X_1X_2 = 0.$$

Решение данной системы имеет вид: $X_1 = -0,0343$; $X_2 = -0,474$; $\lambda = 0,11$. Перевод кодовых значений оптимизируемых факторов в натуральные показал дозу $N_{19}P_{39}K_{39}$ и предпочтение комбинированного способа обработки почвы. Подставляя полученные значения факторов в уравнения (1), получили минимальное значение себестоимости 5,38 тыс.руб./т при урожайности 3,38 т/га и содержании белка в зерне 3-его класса 12%.

Графический анализ уравнений регрессии приведен на рисунке 1.

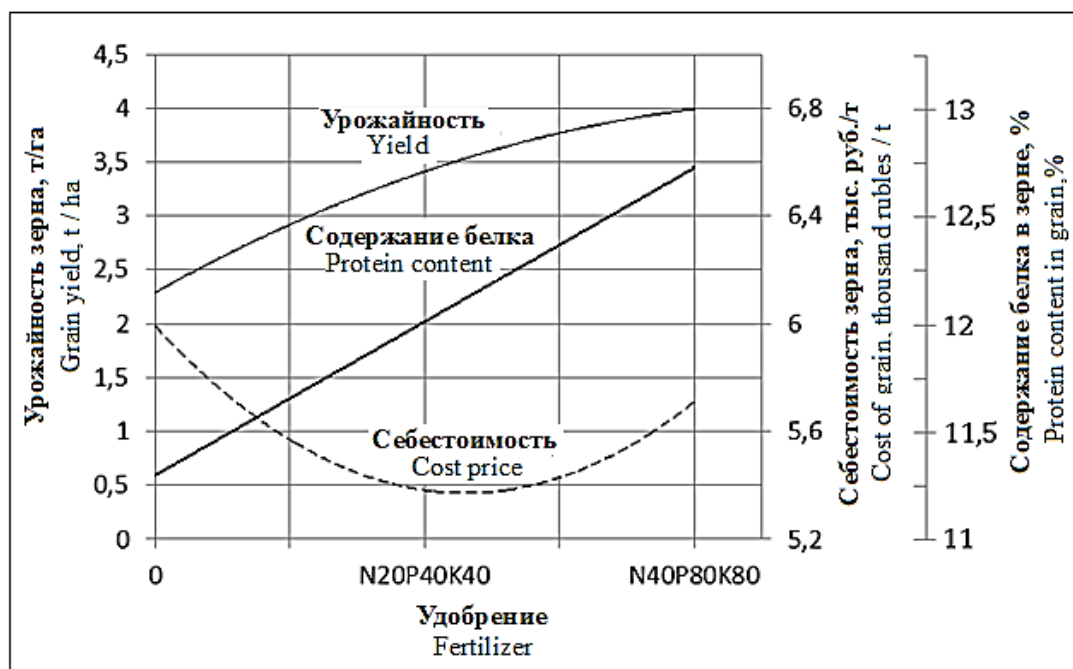


Рисунок 1. Агроэкономические показатели производства озимой пшеницы в зернотравянопропашном севообороте

Figure 1. Agroeconomic indicators of winter wheat production in grain-grass-row crop rotation

С повышением дозы удобрений урожайность зерна и содержание в нём белка возрастает на всём

исследуемом диапазоне. Рост урожайности происходит по нелинейной зависимости с

понижением скорости нарастания равной $\frac{dY_1}{dx_1} = 0,85 - 0,54X_1$. Одновременно линейно наращивается содержание белка в зерне. Себестоимость на участке изменения дозы удобрения от 0 до $N_{19}P_{39}K_{39}$ уменьшается. Но затраты на дальнейшее повышение дозы удобрения не окупаются стоимостью уменьшающейся прибавки урожайности. Поэтому на участке от $N_{19}P_{39}K_{39}$ до $N_{40}P_{80}K_{80}$ себестоимость плавно возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Минимизировать использование ресурсов в интенсивной технологии возделывания озимой пшеницы позволяет углубленная адаптация факторов обработки почвы и удобрения внутри агроэкологической провинции. В условиях земледельческих задач, когда между факторами имеется взаимодействие, эффективность углубленной адаптации возрастает при комплексной оптимизации факторов по инновационной методологии с использованием математического метода неопределённых множителей Лагранжа. Комплексная оптимизация факторов позволила определить способ обработки почвы и дозу удобрения, обеспечивающие минимальную себестоимость производства зерна культуры заданного качества в условиях ЦЧР.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Курский ФАНЦ» по теме № FGZU-2022-0005.

ACKNOWLEDGMENT

The research is carried out within the framework of the state task for Kursk Federal Agricultural Research Centre on the theme No. FGZU-2022-0005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лошаков В.Г. Севооборот и плодородие почвы. Москва: ВНИИА, 2012. 512 с.
2. Гуреев И.И. Принципы углубленной адаптации технологий возделывания сельскохозяйственных культур к исходному состоянию почвы // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. N 9. С. 6-13.
3. Гуреев И.И., Дьяков В.П., Гребенщиков Г.К., Дурдыев С. Региональный регистр комплексов машин для механизации перспективных агротехнологий (рекомендации). Курск: ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2015. 59 с.
4. Holthusen D., Brandt A.A., Reichert J.M., Fleige H., Zink A. Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal // Soil & Tillage Research. 2018. V. 184. P. 78-92. DOI: 10.1016/j.still.2018.07.009
5. Sangines de Carcer P., Sinaj S., Santonja M., Fossati D., Jeangros B. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties // Soil & Tillage Research. 2019. V. 190. P. 209-219. DOI: 10.1016/j.still.2019.01.012
6. Cook R.L., Trlica A. Tillage and fertilizer effects on crop yield and soil properties over 45 years in southern Illinois // Agronomy Journal. 2016. V. 108. Iss. 1. P. 415-426. DOI: 10.2134/agronj2015.0397

7. Хорошкин А.Б. Способы повышения эффективности минерального питания сельскохозяйственных культур. Краснодар: Агромастер, 2010. 67 с. URL: http://agromaster.ru/files/kniga_2011.pdf (дата обращения 23.12.2020)
8. Monreal C., DeRosa M., Mallubhotla S., Bindraban P.S., Dimkpa Ch. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients // Biology and Fertility of Soils. 2016. V. 52. N 3. P. 423-437. DOI: 10.1007/s00374-015-1073-5
9. Ding W., Xu X., He P., Ullah S., Zhang J., Cui Zh., Zhou W. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: a meta-analysis // Field Crops Research. 2018. V. 227. P. 11-18. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.08.001
10. Гуреев И.И. Методологические основы оптимизации ресурсов в производстве продукции земледелия // Земледелие. 2020. N 1. С. 30-32. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10108
11. Donato C., Maestrini B., Pezzuolo A., Marinello F., Sartori L. Modeling soil organic carbon and carbon dioxide emissions in different tillage systems supported by precision agriculture technologies under current climatic conditions // Soil & Tillage Research. 2018. V. 183. P. 51-59. DOI: 10.1016/j.still.2018.06.001
12. Бородюк В.П., Вошинин А.П., Иванов А.З. Статистические методы в инженерных исследованиях. Москва: Высшая школа, 1983. 216 с.

REFERENCES

1. Loshakov V.G. *Sevooborot i plodorodie pochvy* [Crop rotation and soil fertility]. Moscow, VNIIA Publ., 2012, 512 p. (In Russian)
2. Gureev I.I. Principles of in-depth adaptation of crop cultivation technologies to the initial state of the soil. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy]. 2019, no. 9, pp. 6-13. (In Russian)
3. Gureev I.I., Dyakov V.P., Grebenshchikov G.K., Durdyev S. *Regionalnyy registr kompleksov mashin dlya mekhanizatsii perspektivnykh agrotekhnologiy (rekomentatsii)* [Regional register of machine complexes for the mechanization of promising agricultural technologies (recommendations)]. Kursk, All-Russian Research Institute of Agriculture and Soil Protection from Erosion Publ., 2015, 59 p. (In Russian)
4. Holthusen D., Brandt A.A., Reichert J.M., Fleige H., Zink A. Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. *Soil & Tillage Research*, 2018, vol. 184, pp. 78-92. DOI: 10.1016/j.still.2018.07.009
5. Sangines de Carcer P., Sinaj S., Santonja M., Fossati D., Jeangros B. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties. *Soil & Tillage Research*, 2019, vol. 190, pp. 209-219. DOI: 10.1016/j.still.2019.01.012
6. Cook R.L., Trlica A. Tillage and fertilizer effects on crop yield and soil properties over 45 years in southern Illinois. *Agronomy Journal*, 2016, vol. 108, iss. 1, pp. 415-426. DOI: 10.2134/agronj2015.0397
7. Khoroshkin A.B. *Sposoby povysheniya effektivnosti mineralnogo pitaniya selskokhozyaystvennykh kultur* [Ways to improve the efficiency of mineral nutrition of agricultural crops]. Krasnodar, Agromaster Publ., 2010, 67 p. (In Russian). Available at: http://agromaster.ru/files/kniga_2011.pdf (accessed 23.12.2020)
8. Monreal C., DeRosa M., Mallubhotla S., Bindraban P.S., Dimkpa Ch. Nanotechnologies for increasing the crop use

efficiency of fertilizer-micronutrients. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 423-437. DOI: 10.1007/s00374-015-1073-5

9. Ding W., Xu X., He P., Ullah S., Zhang J., Cui Zh., Zhou W. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: a meta-analysis. *Field Crops Research*, 2018, vol. 227, pp.11-18. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.08.001

10. Gureev I.I. Methodological foundations of resource optimization in the production of agricultural products. *Zemledelie [Agriculture]*. 2020, no. 1, pp. 30-32. (In Russian) DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10108

11. Donato C., Maestrini B., Pezzuolo A., Marinello F., Sartori L. Modeling soil organic carbon and carbon dioxide emissions in different tillage systems supported by precision agriculture technologies under current climatic conditions. *Soil & Tillage Research*, 2018, vol. 183, pp. 51-59. DOI: 10.1016/j.still.2018.06.001

12. Borodyuk V.P., Voshchinin A.P., Ivanov A.Z. *Statisticheskie metody v inzhenernykh issledovaniyakh [Statistical methods in engineering research]*. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 216 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Иван И. Гуреев разработал теорию углубленной адаптации технологий возделывания сельскохозяйственных культур и впервые использовал метод неопределённых множителей Лагранжа для решения земледельческих задач. Людмила Б. Нитченко участвовала в закладке полевого опыта и выполнила обработку экспериментальных данных. Иван А. Прущик участвовал в получении экспериментальных данных. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ivan I. Gureev developed the theory of in-depth adaptation of technologies for the cultivation of agricultural crops and for the first time used the method of indefinite Lagrange multipliers to solve agricultural problems. Lyudmila B. Nitchenko participated in the laying of the field experiment and carried out the processing of the experimental data. Ivan A. Prushcik participated in obtaining experimental data. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Иван И. Гуреев / Ivan I. Gureev <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>

Людмила Б. Нитченко / Lyudmila B. Nitchenko <https://orcid.org/0000-0002-8744-6130>

Иван А. Прущик / Ivan A. Prushcik <https://orcid.org/0000-0002-7737-7397>