

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМЛЕДЕЛИИ

И.И. ГУРЕЕВ, доктор технических наук, ORCID ID 0000-0001-5995-3322

E-mail: gureev06@mail.ru

ФГБНУ «КУРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР», Г. КУРСК

Предложено формировать математические модели процессов в земледелии на основе статистических методов планирования многофакторных экспериментов, аппроксимируя результаты исследований уравнениями регрессии. Показано наличие взаимосвязи между факторами характерное большинству земледельческих задач. Поэтому установлено определять стационарные значения функции параметра оптимизации совместно с дополнительными условиями в виде эмпирических уравнений связи, используя метод неопределённых множителей Лагранжа. Для планирования экспериментов рекомендуется центральный ортогональный композиционный план, который позволяет независимо оценивать коэффициенты уравнений регрессии и их дисперсии, а незначимые коэффициенты исключать из уравнений без пересчёта остальных коэффициентов. Сокращение вычислительных работ и снижение риска случайных ошибок при пользовании методом достигается кодированием факторов показателями, не имеющими размерности. Практическая целесообразность применения метода определена на примере опытных данных по комплексной оптимизации факторов обработки почвы и удобрения в технологии производства озимой пшеницы. Влияние факторов на урожайность зерна культуры, содержание белка в нём и себестоимость производимой продукции изучали в 2016 году в полевом опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Медвенский район, Курской области) на склоне северной экспозиции в зернотравянопропашном севообороте. Методом неопределённых множителей Лагранжа определили оптимальную дозу удобрения величиной $N_{19}P_{39}K_{39}$ и предпочтение комбинированного способа обработки почвы, которые соответствуют минимальной себестоимости зерна озимой пшеницы 5,38 тыс.руб./т при урожайности 3,38 т/га. Полученное зерно 3-его класса с содержанием белка 12%.

Ключевые слова: земледелие, цифровая оптимизация, математическое моделирование, метод Лагранжа, озимая пшеница, оптимизация ресурсов.

Для цитирования: Гуреев И.И. Моделирование и цифровая оптимизация процессов в земледелии // Зернобобовые и крупяные культуры. 2023; 3(47):114-121. DOI: 10.24412/2309-348X-2023-3-114-121

SIMULATION AND DIGITAL OPTIMIZATION OF PROCESSES IN AGRICULTURE

I.I. Gureev

FSBSI «FEDERAL AGRICULTURAL KURSK RESEARCH CENTER», Kursk

Abstract: *It is proposed to form mathematical models of processes in agriculture on the basis of statistical methods for planning multifactorial experiments, approximating the results of research by regression equations. The presence of the relationship between the factors characteristic of most agricultural tasks is shown. Therefore, it is established to determine the stationary values of the optimization parameter function together with additional conditions in the form of empirical connection equations, using the method of undetermined Lagrange multipliers. For planning experiments, a central orthogonal compositional design is recommended, which allows you to*

independently evaluate the coefficients of the regression equations and their variances, and exclude insignificant coefficients from the equations without recalculating the remaining coefficients. Reducing computational work and reducing the risk of random errors when using the method is achieved by coding factors with indicators that do not have dimensions. The practical expediency of applying the method is determined on the example of experimental data on the integrated optimization of soil tillage and fertilizer factors in the technology of winter wheat production. The influence of factors on the yield of crop grain, the protein content in it and the cost of production were studied in 2016-2020. in the field experiment of the Federal Agricultural Kursk Research Center (Medvensky district, Kursk region) on the slope of the northern exposure in a grain-grass-rowed crop rotation. Using the method of indefinite Lagrange multipliers, we determined the optimal dose of fertilizer N19P39K39 and the preference for the combined method of tillage, which correspond to the minimum cost of winter wheat grain 5.38 thousand rubles/t with a yield of 3.38 t/ha. Received grain of the 3rd class with a protein content of 12%.

Keywords: agriculture, digital optimization, mathematical modeling, Lagrange method, winter wheat, resource optimization.

Введение

Российское сельское хозяйство важнейшая отрасль экономики, где занято почти 6% человеческих ресурсов, производящих 4,5% валового внутреннего продукта страны [1]. Определяющий сектор современного сельского хозяйства – земледелие в настоящее время развивается преимущественно на основе инноваций и цифровых технологий, что способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур и производительности труда, сохранению плодородия почвы и защите окружающей среды [2-6].

Без цифровых технологий невозможна эффективная оптимизация процессов в земледелии, позволяющая повышать рентабельность производственных процессов за счёт рационального использования ресурсов [7]. При этом труд аграриев на выполнении специфических агротехнических приёмов, требующих больших физических усилий, автоматизируется.

Цифровые технологии базируются на математических моделях, которые должны отражать сущность изучаемых процессов и учитывать все факторы, оказывающие значимое влияние на цель исследований. В то же время необходимо стремиться к упрощению модели, не отягощая её второстепенными факторами, так как их учёт осложняет математический анализ и повышает риск случайных ошибок.

Удачные модели создают специалисты в области исследований, имеющие подготовку по высшей математике, теории ошибок, формированию линейных и нелинейных уравнений, математическому программированию и др. [8-9]. Исследователь к тому же должен владеть основами теории вероятностей, позволяющими оперировать статистическими данными. Особые требования к этой области математической подготовки объясняются спецификой процессов, происходящих в земледелии, где большинство агротехнических приёмов проводится в условиях ограниченной определённости с исходом от случайных факторов. При построении моделей используют математический аппарат различной направленности и сложности. Структура моделей должна позволять формализовать с требуемой надёжностью закономерности взаимодействия элементов агротехнологий [10].

Распространены и убедительны физические модели. Они могут быть представлены в виде простых алгебраических уравнений, сложные же явления в динамике описываются дифференциальными уравнениями. Отражая физическую сущность процессов и основные закономерности, физические модели требуют минимальный экспериментальный материал и более приспособлены для математической оптимизации. Условия применения физических моделей почти всегда не ограничены. Но, как правило, они базируются на каких-то допущениях и учитывают меньшее число факторов.

Для решения сельскохозяйственных задач с наличием большого числа переплетающихся переменных случайных факторов (погода, свойства почвы и др.) предпочтительно моделирование на основе статистического планирования экспериментов. Статистические модели более точны, так как не требуют грубых допущений и способны учитывать большое число факторов. Наиболее эффективны они при наличии обширных опытных данных, полученных в границах применения результатов эксперимента.

Метод статистического моделирования отличается повышенными возможностями адекватного представления получаемых данных, в том числе использованием более точных нелинейных моделей. Данный метод вносит следующие положительные последствия, повышая эффективность традиционных экспериментальных методик:

- обработка результатов эксперимента формализована, результаты поддаются аппроксимации, что упрощает и расширяет анализ и сравнение различных данных;
- результаты эксперимента представляют в виде линейных и нелинейных математических зависимостей между воздействующими факторами и изучаемыми параметрами оптимизации с использованием компьютерной техники;
- одинаковая точность достигается сокращением в 3-10 раз количества необходимых опытов;
- можно одновременно рассмотреть связь между большим числом факторов, оценить долю влияния каждого из них и отсеять второстепенные;
- результаты эксперимента можно представить графически в двух- трёхмерных факторных пространствах;
- область оптимума определяют математическими методами.

Построение оптимизационных статистических моделей начинается, прежде всего, с формулировки параметров оптимизации – критериев, по которым оценивается эффективность. Содержание параметров оптимизации определяется решаемыми исследовательскими задачами. Разные решения сравниваются между собой по показателю эффективности, отражающему целевую направленность исследований. Лучшее решение в максимальной степени способствует достижению поставленной цели и является оптимальным.

Приоритетные для земледелия параметры оптимизации агротехнологические (урожайность и качество выращиваемой продукции) и экономические (величина прибыли, себестоимость, рентабельность и др.). По словам Д.И. Менделеева «наука начинается там, где свойство может быть выражено числом». Поэтому оптимальное решение предполагает его количественную оценку.

Следует учитывать, что неудачный выбор показателя эффективности приводит к неоправданным затратам. Например, производство какой-то сельскохозяйственной культуры без учёта конъюнктуры рынка может оказаться убыточным.

В земледелии редко встречаются задачи, где единственный критерий оценки однозначно диктуется целевой направленностью. Так, наряду с урожайностью необходимо учитывать и качество производимой сельскохозяйственной продукции. Постановка же задачи максимизации урожайности и качества продукции в научном плане нереальна. Поэтому применяют подходы линейного программирования, выделяя главный параметр оптимизации и обращая его в максимум (минимум). Все остальные параметры ограничивают в пределах заданных значений, формализуя их линейными взаимосвязями параметров оптимизации с факторами. Но сложные процессы в земледелии не всегда с достаточной точностью аппроксимируются линейными взаимосвязями.

Целью настоящих исследований является повышение достоверности опытных данных в земледелии путём совершенствования методики моделирования и цифровой оптимизации процессов с использованием статистических методов планирования многофакторных экспериментов.

Материалы и методы исследований

Традиционно при решении исследовательских задач в земледелии, прежде всего, строят эмпирическую модель основного параметра оптимизации Y в зависимости от факторов X_n , принимающих в некоторый момент определённые дискретные значения:

$$Y = Y(X_1, X_2, \dots X_n);$$

где n – количество факторов.

По модели, используя математический аппарат, проводят оптимизационные действия относительно функции Y . Остальные параметры оптимизации используют в виде ограничений. Условием для определения экстремальных значений функции Y является равенство нулю её первой производной по каждому из изучаемых факторов:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0; \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0; \dots \frac{\partial Y}{\partial X_n} = 0.$$

Решением полученной системы уравнений получают n оптимальных значений изучаемых факторов, которые являются стационарными точками функции Y .

Однако во многих сельскохозяйственных задачах между факторами X_n существует взаимосвязь. Например, эффективное производство озимой пшеницы характеризуется не только высокой урожайностью зерна. Очень важно, чтобы производимое зерно обладало определёнными показателями качества, из которых основным является содержание белка. В данном случае оптимизационная задача ориентируется на определение значений факторов, соответствующих получению максимальной урожайности зерна обозначенного качества. Поэтому оптимизацию следует проводить с учётом уравнения связи φ факторов X_n с показателями качества зерна, в данном случае с содержанием белка в зерне:

$$\varphi = \varphi(X_1, X_2, \dots X_n) = 0.$$

Оптимизационные задачи такого типа успешно решаются применением метода неопределённых множителей Лагранжа, согласно которому условие стационарности функции Y имеет вид:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial X_1} = 0; \frac{\partial Y}{\partial X_2} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial X_2} = 0; \dots \frac{\partial Y}{\partial X_n} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial X_n} = 0; \quad (1)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Количество уравнений (1) должно соответствовать количеству исследуемых факторов n .

Результаты и их обсуждение

Практическая целесообразность применения метода неопределённых множителей Лагранжа наглядно определена на примере комплексной оптимизации факторов обработки почвы и удобрения в технологии производства озимой пшеницы по экспериментальным данным, полученным в 2016 г. в стационарном многофакторном полевом опыте Курского ФАНЦ. Опытный участок расположен на склоне северной экспозиции в зернотравянопаропропашном севообороте, развёрнутом во времени. Почва – чернозём типичный тяжелосуглинистый слабосмытый с содержанием гумуса 5,1%. Солевая вытяжка $pH_{КСI}=5,7$. Содержание щёлочногидролизуемого азота – 18, подвижного фосфора – 9,3 и обменного калия – 8,8 мг на 100 г почвы.

Метеорологические условия в период выполнения исследований были достаточно благоприятными для производства озимой пшеницы (табл. 1).

Таблица 1

Метеорологические условия исследований

Сведения 2015 года		Осадки холодного периода (устойчивый переход среднесуточной температуры ниже 5°C), мм	Сведения за период вегетации озимой пшеницы в 2016 году					
август-сентябрь			апрель-май		июнь-июль		апрель-июль	
Осадки, мм	ГТК		Осадки, мм	ГТК	Осадки, мм	ГТК	Осадки, мм	ГТК
90	0,8	203	104	1,4	95	0,8	199	1,1

Изучали влияние факторов на урожайность зерна культуры, содержание белка в нём и себестоимость производимой продукции. Принцип углубленной адаптации технологии состоит в минимизации интенсивности обработки почвы в допустимых пределах, что позволяет экономно расходовать ресурсы и оказывать щадящее воздействие на окружающую среду [11]. Другим наиболее значимым ресурсным элементом технологии является удобрение, без которого немыслима интенсификация производства культуры. Удобрение является мощным рычагом управления продуктивностью растений при одновременном снижении потерь питательных веществ почвой [12].

Уровни качественного фактора способов основной обработки почвы: отвалный на глубину 20-22 см, комбинированный (отвальная обработка на глубину 20-22 см + дискование на глубину 8-10 см), безотвалный на глубину 20-22 см. Количественный фактор доза удобрения варьировал на уровнях – без удобрений, $N_{20}P_{40}K_{40}$, $N_{40}P_{80}K_{80}$.

Сократить объём вычислительных работ и снизить риск случайных ошибок позволяет кодирование натуральных значений факторов (табл. 2).

Таблица 2

Уровни варьируемых факторов

Фактор	Обозначение	Кодовые		
		-1	0	1
		Натуральные		
Доза удобрения	X_1	0	$N_{20}P_{40}K_{40}$	$N_{40}P_{80}K_{80}$
Способ обработки почвы	X_2	Отвалный	Комбинированный	Безотвалный

Для планирования эксперимента выбрали центральный ортогональный композиционный план, особенностью которого является независимость математических ожиданий и дисперсий коэффициентов уравнений регрессии, а также возможность исключать из уравнений незначимые коэффициенты регрессии без пересчёта остальных коэффициентов. Матрицу планирования эксперимента реализовали для урожайности зерна культуры, содержания белка в нём и себестоимости производимой продукции (табл. 3).

Результаты эксперимента, 2016 г.

№ опыта	Уровни варьирования факторов		Урожайность зерна озимой пшеницы, т/га				Содержание белка в зерне, %				Себестоимость зерна, тыс. руб./т			
	X ₁	X ₂	повторения			среднее	повторения			среднее	повторения			среднее
			1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1	1	1	3,43	4,34	4,35	4,04	11,7	11,3	14,9	12,6	6,54	5,22	5,20	5,65
2	1	-1	3,7	4,17	4,62	4,16	12,4	11,7	14,9	13,0	6,57	5,70	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	4,40	4,40	3,97	11,0	11,7	15,0	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	11,0	10,7	6,95	5,34	5,90	6,06
7	0	1	3,06	3,06	3,97	3,36	10,8	10,6	14,8	12,1	5,90	5,90	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	6,30	5,12	4,50	5,31

По данным табл. 3 получили адекватные второй степени уравнения регрессии, которые более точно описывают процесс в сравнении с линейными уравнениями:

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{п}} &= 3,41 + 0,85X_1 - 0,14X_2 + 0,08X_1X_2 - 0,27X_1^2 + 0,12X_2^2, \frac{\text{т}}{\text{га}}; \\
 C &= 5,38 - 0,14X_1 - 0,17X_1X_2 + 0,47X_1^2, \frac{\text{тыс. руб.}}{\text{т}}; \\
 B &= 12,0 + 0,73X_1 - 0,06X_2 + 0,21X_1X_2, \%
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

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 $B=12\%$.

Оценили: статистическую значимость коэффициентов уравнений регрессии по t -критерию Стьюдента, воспроизводимость эксперимента по критерию Кохрена, адекватность описания исследуемого процесса полиномом второй степени по F -критерию Фишера.

Для оптимизации процесса в соответствии с целью исследований использовали систему уравнений (1) дополненным уравнением связи факторов:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C}{\partial X_1} + \lambda \frac{\partial B}{\partial X_1} &= 0; \\
 \frac{\partial C}{\partial X_2} + \lambda \frac{\partial B}{\partial X_2} &= 0; \\
 \varphi = B - 12,0 - 0,73X_1 + 0,06X_2 - 0,21X_1X_2 &= 0, \%.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Уравнения (2) преобразовали согласно модели (3), откуда:

$$\begin{aligned}
 -0,14 + 0,94X_1 - 0,17X_2 + \lambda(0,73 - 0,21X_2) &= 0; \\
 -0,17X_1 + \lambda(-0,06 - 0,21X_1) &= 0; \\
 \varphi = B - 12,0 - 0,73X_1 + 0,06X_2 - 0,21X_1X_2 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Решение системы уравнений (4) имеет вид: $X_1 = -0,034$; $X_2 = -0,474$; $\lambda = 0,11$. Обратным переводом кодовых значений факторов в натуральные определили оптимальную дозу $N_{19}P_{39}K_{39}$ и установили предпочтение комбинированного способа обработки почвы. Оптимальные значения факторов подставили в уравнения (2) и получили минимальное значение себестоимости 5,38 тыс.руб./т при урожайности 3,38 т/га и содержании белка в зерне 3-его класса 12%.

Заключение

Оптимизировать процессы в земледелии позволяют цифровые технологии. Стационарные значения функции параметра оптимизации процессов целесообразно определять совместно с дополнительными условиями в виде уравнения связи, используя метод неопределённых множителей Лагранжа. Результаты комплексной цифровой оптимизации наглядно отображены на примере технологии производства озимой пшеницы.

Работа выполнена по теме Государственного задания № FGZU-2022-0005.

Литература

1. Akmarov P.B., Knyazeva O.P., Tretyakova E.S. Assessing the potential of the digital economy in agriculture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020. IOP Publishing Ltd, 2021. С. 042036. EDN: OZLJEC.
2. Степанов М.В. К вопросу о развитии цифровой экономики и цифрового сельского хозяйства // В сборнике: Современная экономика: актуальные проблемы, задачи и траектории развития. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Курск, 2020. С. 216-223. EDN: XXCOPQ.

3. Teucher M., Conrad C., Thürkow D., Alb P. Digital in situ data collection in earth observation, monitoring and agriculture-progress towards digital agriculture // *Remote Sensing*. 2022. T. 14. No 2. DOI: 10.3390/rs14020393.
4. Osipov V.S., Vorozheykina T.M., Bogoviz A.V., et al. Innovation in agriculture at the junction of technological waves: moving from digital to smart agriculture // *Smart Innovation in Agriculture*. Part of the Smart Innovation, Systems and Technologies book series. Singapore, 2022. C. 21-27. DOI: 10.1007/978-981-16-7633-8_3.
5. Kushnir I., Samodelov A. The digital transformation of agriculture in the context of the digital inequality // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Ser. "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East, AFE 2021 - Papers" 2021. C. 032068. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032068.
6. Frolova O.A., Yukhlina J.A., Voronov Y.V., et al. Overview of digital solutions for agriculture // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. T. 186. C. 238-250. DOI: 10.1007/978-3-030-66093-2_23.
7. Nehrey M., Zomchak L. Digital technology: emerging issue for agriculture // *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. T. 135. C. 146-156. DOI: 10.1007/978-3-031-04809-8_13.
8. Romanyuk M.A., Sukharnikova M.A., Chekmareva N.V., et al. Strategic priorities for developing digital economy in russian agriculture // *Unlocking Digital Transformation of Agricultural Enterprises*. Technology Advances, Digital Ecosystems, and Innovative Firm Governance. Ser. "Innovation, Technology, and Knowledge Management" Cham, 2023. C. 69-78. EDN: QBLLKR.
9. Golubev A.V., Smoleninova N.A., Babkina V.S. The perception of digital technologies by agrarians as a condition for innovative development of the agriculture // *Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration*. Volume 2. Ser. "Lecture Notes in Networks and Systems, 280" Luxembourg, 2021. C. 30-38. DOI: 10.1007/978-3-030-80485-5_5.
10. Щитов С.Е. Эколого-экономическое моделирование в агромелиоративном земледелии в целях адаптации сельского хозяйства к транзитивным кризисам // *Экономика и экология территориальных образований*. 2021. Т. 5. No 1. C. 42-47. DOI: 10.23947/2413-1474-2021-5-1-42-47.
11. De Cárcer P.S., Sinaj S., Fossati D., et al. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties // *Soil & Tillage Research*. 2019. V. 190. Pp. 209–219.
12. 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. No 1. Pp. 415-426.

References

1. Akmarov P.B., Knyazeva O.P., Tretyakova E.S. Assessing the potential of the digital economy in agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science. ISTCEarthScience 2020. IOP Publishing Ltd. 2021. P. 042036. EDN: OZLJEC. (In Russian).
2. Stepanov M.V. К вопросу о развитии цифровой экономики и цифрового сельского хозяйства. В сборнике: *Современная экономика: актуальные проблемы, задачи и траектории развития*. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Курск. 2020. P. 216-223. EDN: XXCOPQ.
3. Teucher M., Conrad C., Thürkow D., Alb P. Digital in situ data collection in earth observation, monitoring and agriculture-progress towards digital agriculture. *Remote Sensing*. 2022. T. 14. No 2. DOI: 10.3390/rs14020393.
4. Osipov V.S., Vorozheykina T.M., Bogoviz A.V., et al. Innovation in agriculture at the junction of technological waves: moving from digital to smart agriculture. *Smart Innovation in Agriculture*. Part of the Smart Innovation, Systems and Technologies book series. Singapore. 2022. P. 21-27. DOI: 10.1007/978-981-16-7633-8_3.
5. Kushnir I., Samodelov A. The digital transformation of agriculture in the context of the digital inequality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Ser. "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East. AFE 2021 - Papers" 2021. P. 032068. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032068.
6. Frolova O.A., Yukhlina J.A., Voronov Y.V., et al. Overview of digital solutions for agriculture. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. T. 186. P. 238-250. DOI: 10.1007/978-3-030-66093-2_237.
7. Nehrey M., Zomchak L. Digital technology: emerging issue for agriculture. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. T. 135. P. 146-156. DOI: 10.1007/978-3-031-04809-8_13.
8. Romanyuk M.A., Sukharnikova M.A., Chekmareva N.V., et al. Strategic priorities for developing digital economy in russian agriculture. *Unlocking Digital Transformation of Agricultural Enterprises*. Technology Advances. Digital Ecosystems. and Innovative Firm Governance. Ser. "Innovation, Technology, and Knowledge Management" Cham. 2023. P. 69-78. EDN: QBLLKR.
9. Golubev A.V., Smoleninova N.A., Babkina V.S. The perception of digital technologies by agrarians as a condition for innovative development of the agriculture. *Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration*. Volume 2. Ser. "Lecture Notes in Networks and Systems, 280" Luxembourg. 2021. P. 30-38. DOI: 10.1007/978-3-030-80485-5_5.
10. Shchitov S.E. Эколого-экономическое моделирование в агромелиоративном земледелии в условиях адаптации сельского хозяйства к транзитивным кризисам. *Экономика и экология территориальных образований*. 2021. Т. 5. No 1. P. 42-47. DOI: 10.23947/2413-1474-2021-5-1-42-47. (In Russian).
11. De Cárcer P.S., Sinaj S., Fossati D., et al. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties // *Soil & Tillage Research*. 2019. V. 190. Pp. 209–219.
12. 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. No 1. Pp. 415-426.