

## NEURO-ANALYTICAL FORECASTING OF YIELD IN PROGRAMMED CULTIVATION OF AGRICULTURAL CROPS TAKING INTO ACCOUNT AGROTECHNOLOGICAL FACTORS

A. F. Rogachev, E. V. Melikhova, E. P. Borovoy, I. S. Belousov

*Volgograd State Agrarian University  
Volgograd, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: rafr@mail.ru

Received 10.10.2023

Submitted 13.11.2023

*The article was prepared with the financial support of the RFBR and the Administration of the Volgograd Region under project No. 19-416-340014*

### Summary

Modeling the processes of bio-productivity of agricultural land is a complex multisectoral problem. The combination of a variety of biological, soil-climatic, agrotechnological and organizational-economic factors for crop forecasting requires the use, adaptation and improvement of intersectoral methods and approaches, including those based on artificial intelligence (AI).

### Abstract

**Introduction.** Agricultural production planning involves the improvement of methods for forecasting the yield and productivity of agricultural crops. In the field of agricultural production, various forecasting methods are used, including trend-seasonal statistical models, as well as artificial intelligence and machine learning methods. However, the practical implementation of such approaches constrains its wide application, in particular, the use of an iterative algorithm of variationally weighted approximations. **Object.** The object is the BP of long-term yield levels of various agricultural crops. **Methods.** Agrophysical processes are modeled by linear and nonlinear ordinary differential equations (ODES), as well as partial differential equations. For statistical evaluation and approximation of empirical results, the method of least modules and its weighted or generalized modifications were used. The fundamental assumption of modeling formulated by A. P. Likhatchevich (Belarus), it is accepted that each of the crop-forming factors, for example, mineral nutrition and heat and moisture availability, informs him of a change that does not depend on the effects of other factors. This can be used in mathematical modeling of the forecast yield by means of differential equations. Numerical studies for the preliminary analysis of the obtained results were carried out in the MS Excel v. 2016 environment. **Results and discussion.** If the modeling of the crop yield level of factors is not linked to the biological characteristics of crops and climatic conditions, then such mathematical models will be quite universal and can adapt to different conditions. Based on the factorial approach of A. P. Likhatchevich, the authors obtained an analytical dependence that provides an operational adjustment of the forecast yield taking into account the results of segmentation of the state of crops. It is shown that it is possible to estimate the level of yield reduction using the analytical dependence obtained by the authors, taking into account the numerical processing of the results of segmentation of the state of agricultural fields, in particular the value of Rdefectn obtained in the process of intelligent segmentation of the sowing area, with a given Ri, add. **Conclusions.** The calculations carried out showed, in particular, that the decrease in the estimated yield on the example of barley from the maximum value of 71.4 c/ha, with values of Rdefectn = 0.2 and the accepted maximum permissible Ri, dop = 0.6 will be up to 55.6 c/ ha, and the reduction in yield will be 22%.

**Key words:** crop yield forecasting, crop productivity modeling, programmed crop cultivation.

**Citation.** Rogachev A. F. Melikhova E. V., Borovoy E. P., Belousov I. S. Neuro-analytical forecasting of yield in programmed cultivation of agricultural crops taking into account agrotechnological factors. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2023. 4(72). 418-427 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-42.

**Author's contribution.** The authors of this study were directly involved in formulating the problem, planning the study, analyzing, presenting conclusions and preparing proposals for production. The authors of this article have reviewed and approved the final version of the article.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.58:551.5

**НЕЙРО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ПРИ ПРОГРАММИРУЕМОМ ВОЗДЕЛЫВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С УЧЕТОМ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ****А. Ф. Рогачев**, доктор технических наук, профессор**Е. В. Мелихова**, доктор технических наук, доцент**Е. П. Боровой**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор**И. С. Белоусов**, соискательФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ  
г. Волгоград, Российская Федерация*Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 20-37-90142*

**Актуальность.** Планирование сельскохозяйственного производства предполагает совершенствование методов прогнозирования урожайности и продуктивности агрокультур. В сфере аграрного производства применяются различные методы прогнозирования, включая тренд-сезонные статистические модели, а также методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Однако практическая реализация таких подходов сдерживает его широкое применение, в частности использование итерационного алгоритма вариационно-взвешенных приближений. **Объект исследования** – ВР многолетних уровней урожайности различных сельскохозяйственных культур. **Методы исследования.** Агрофизические процессы биопродуктивности с.-х. культур моделируются линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями (ОДУ), а также дифференциальными уравнениями в частных производных. Для статистической оценки и аппроксимации эмпирических результатов использовался метод наименьших модулей и его взвешенная или обобщенная модификация. Основопологающим допущением моделирования, сформулированным А. П. Лихацевичем (Беларусь), принято, что каждый из факторов, формирующих урожайность, например уровень минерального питания и тепло- и влагообеспеченность, привносит изменение, не зависящее от влияния других факторов. Это может использоваться при математическом моделировании прогнозной урожайности посредством дифференциальных уравнений. Численные исследования для предварительного анализа получаемых результатов проводились в среде MS Excel v. 2016. **Результаты и обсуждение.** Если моделирование уровня урожайности сельскохозяйственных культур факторов не увязывать с биологическими особенностями сельскохозяйственных культур и природно-климатическими условиями, то такие математические модели окажутся достаточно универсальными и могут адаптироваться для различных условий. На основе факторного подхода А. П. Лихацевича авторами получена аналитическая зависимость, обеспечивающая оперативную корректировку прогнозной урожайности с учетом результатов сегментации состояния посевов. Проиллюстрирована на расчетах с использованием полученной авторами аналитической зависимости оценка снижения урожайности на основе численной обработки результатов сегментации состояния сельскохозяйственных полей, в частности величины  $R_{\text{defectn}}$ , полученной в процессе интеллектуального сегментирования участка посева, при задаваемом  $R_{\text{i,доп}}$ . **Выводы.** Подтверждено расчетами, что снижение урожайности, на примере ячменя, от максимального значения 71.4 ц/га, при значениях  $R_{\text{defectn}} = 0.2$  и принятом предельно допустимом  $R_{\text{i,доп}} = 0.6$  составит до 55.6 ц/га, а сокращение урожайности составит 22%.

**Ключевые слова:** прогнозирование урожайности, моделирование продуктивности культур, программированное возделывание культур.

**Цитирование:** Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В., Боровой Е. П., Белоусов И. С. Нейро-аналитическое прогнозирование урожайности при программируемом возделывании сельскохозяйственных культур с учетом агротехнологических факторов. *Известия НВ АУК*. 2023. 4(72). 418-427. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-42.

**Авторский вклад.** Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились с представленным окончательным вариантом и одобрили его.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Резюме.** Моделирование биопродуктивности сельскохозяйственных культур возможно на основе математической модели, учитывающей факторы внешней среды и оперативное состояние посевов. Прогнозирование урожайности возможно на основе адаптации и совершенствования факторного нейро-аналитического подхода, в том числе на основе методов искусственного интеллекта, включая семантическую сегментацию.

**Введение.** Основы программируемого возделывания сельскохозяйственных культур заложены в работах академиков ВАСХНИЛ и РАН С. Ф. Аверьянова, Б. Ю. Маслова, Г. Е. Листопада, И. П. Кружилина, В. Н. Щедрина, и других ученых. Возможности прогнозирования урожайности на основе математического моделирования различных аспектов обеспечения биопродуктивности, определяемой физическими процессами в системе «почка-растение-атмосфера». Моделирование различных аспектов аграрного производства заложены чл.-корр. А. П. Лихацевичем (Республика Беларусь), В. И. Ольгаренко, В. А. Кардашом, А. С. Фальковичем, В. В. Корсаком и другими исследователями.

Эффективность аграрного производства прежде всего определяет урожайность возделываемых культур, определяемая рядом факторов различной природы. В работах В. Филина, Р. Полуэктова, Н. Пронько, Ф. Микаэлсо, Т. Сафроновой, Л. Хворовой, А. Цепляева, А. Шеина и других ученых исследуются процессы агрофизики почв, вегетационных циклов, динамики мелиоративных процессов различных почвенно-климатических зон.

Сложность исследования агрофизических процессов обусловлена тем, что, как указано в работе Т. И. Сафроновой, «почва как объект сельскохозяйственного использования и мелиорации является открытой саморегулирующейся системой, существование и функционирование которой обеспечивается постоянным обменом веществ и энергией с окружающей средой (растениями, атмосферой, поверхностными и подземными водами, почвообразующими породами)» [1].

Проблемность адекватного моделирования сложных агрофизических систем определяется необходимостью адаптации моделей к различным специфическим почвенно-климатическим условиям [2, 3]. В частности, в работе Л. А. Хворовой [4] рассматривается моделирование и оптимизация агро-, био- и экосистем на основе их структурно-параметрической идентификации. Авторы на модульной основе моделируют балансовые структуры, описывающие динамику процессов в системе «почва – растение – атмосфера».

Продукционные процессы моделируются с использованием аппарата линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, в частности обыкновенных (ОДУ), например, в форме

$$A \cdot \varphi = f, \quad (1)$$

где  $A$  представляет собой некоторый дифференциальный оператор.

Решение (1) ищется в виде функции  $\varphi(x, t)$ , определяемой в некоторой области  $Q$ . В одномерном случае операторы  $A, B$  могут принимать вид (2) с краевыми условиями  $B\varphi = g$ :

$$A\varphi = A_1 \frac{\partial A_2 \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x} - A_4 \varphi - A_5 \right) + A_6 \varphi; \quad (2)$$

$$B\varphi = B_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} + B_2 \varphi. \quad (3)$$

Моделирование влагопереноса в почве по вертикальной координате  $x$ , как важнейшего условия развития растений, определяется законом Дарси и можно описывать известным уравнением Ричардса [5]:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^w(P) \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} - 1 \right) - f(x, t), \quad (4)$$

где  $\theta$  – объемная влажность;  $P$  – капиллярный потенциал почвенной влаги;  $k^w(P)$  – гидропроводность почвы;  $f(x, t)$  – поглощение влаги корнями растений  $t$  – время.

Динамика прироста биомассы растений с учетом органики, приведенная в статье В. Четырбоцкого и др. [6], математически моделируется системой ДУ, где два последних уравнения характеризуют изменение органики:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial B}{\partial t} = f_B(T, W) [d_0 - \varphi(t) + \sum_{i=1}^{n_c} d_i^{(c)} C_i + \sum_{k=1}^{n_y} d_k^{(y)} Y_k - d_1 B] B \\ B(0, x, y, z) = B_{\min}(x, y, z) \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \varphi(t) B - (d_0^{(s)} + \sum_{k=1}^{n_y} d_k^{(s)} Y_k) S + D_S \nabla^2 S \\ S(0, x, y, z) = S_0(x, y, z) \end{array} \right. , \quad (5)$$

где функция  $f_B(T, W)$  описывает влияние температурно-влажностного режимов.

Семейство математических моделей, описывающих влияние основных агротехнических факторов на величину урожая, предложено академиком А. П. Лихацевичем (Беларусь) в работах [7]. Предпосылки и допущения, обосновывающие математическое моделирование, не увязаны с биологическими особенностями сельскохозяйственных культур и складывающихся природно-климатических условий, поэтому математические модели достаточно универсальны и могут адаптироваться для различных культур.

Основной предпосылкой аналитического подхода А. Лихацевича состоит в том, что «бесконечно малое изменение урожая  $Y$  под воздействием какого-то фактора  $R_i$  (влаги, пищи, тепло) пропорционально произведению восприимчивости урожая к действию данного фактора на характеристику воздействия этого фактора на урожай» [7]. Подход к моделированию урожайности с учетом причинно-следственного влияния описывается следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial Y}{\partial R_i} = \alpha_i f_i(Y, R_i) g_i(R_i), \quad (6)$$

где  $Y$  – уровень урожайности;  $\alpha_i$  – безразмерная константа;  $f_i(Y, R_i)$  – аналитическая функция, моделирующая восприимчивость воздействия на  $Y$   $i$ -го фактора;  $g_i(R_i)$  – безразмерная зависимость воздействия на  $Y$   $i$ -го фактора.

Одним из основополагающих допущений моделирования, сформулированное в цитируемой статье А. П. Лихацевича, принято, что «... каждый из факторов, действующих на урожай, сообщает ему изменение, не зависящее от воздействий других факторов» [7]. Установлено, что растения можно моделировать как объекты с памятью, для которых значение урожая формируется внутренними и внешними факторами окружающей среды, включая долгосрочные. Лихацевичем А. П. показано, что по сравнению с

однофакторным прогнозом урожайности, учитывающим только уровень минерального питания, введение в модель дополнительных факторов (водного и теплового) позволяет повысить надежность аппроксимации результатов полевого опыта.

Приведенный аналитический обзор задач моделирования показателей сельскохозяйственного производства подтверждает, что для повышения точности прогнозирования требуется, наряду с классическими, применение и интеллектуальных методов моделирования с использованием ИИ, в частности нейросетевых. При этом с целью повышения точности перспективным является сочетание нейросетевых и аналитических подходов.

**Методы исследования.** Цветные изображения сельскохозяйственных полей высокого разрешения для нейро-аналитической корректировки прогнозной урожайности  $Y$  получали с помощью БПЛА [10], или специализированных спутников, например, Landsat [12].

При математическом моделировании прогнозного значения урожайности  $Y$  для уточнения результатов прогнозирования посредством учета в дифференциальных уравнениях дополнительного фактора  $R_i$ , авторами использован подход, сформулированный А. Лихацевичем [7]

$$\frac{\partial Y}{\partial R_i} = \alpha_i f \left( \frac{Y_{\max}, Y}{R_{i(\text{opt})}, R_i, R_{i(\text{min, max})}} \right) g \left( \frac{R_{i(\text{opt})}, R_i}{R_{i(\text{opt})}, R_i, R_{i(\text{min, max})}} \right), \quad (7)$$

где  $\alpha_i$  – параметр интенсивности влияния  $i$ -го фактора на  $Y$ ;  $R_i(\text{opt})$  - оптимум,  $R_i(\text{min})$  – допустимый минимум;  $R_i(\text{max})$  – максимум величины урожая;  $f$  – функция, моделирующая восприимчивость влияния  $i$ -го фактора,  $g$  – управляющее воздействие.

Таким образом, за основу аналитического моделирования совместного влияния внешних факторов на урожайность сельскохозяйственных культур принималась факторная модель А. Лихацевича, которым обоснованы базовые предпосылки факторной математической модели. В частности, влагообеспеченность в зонах достаточного увлажнения можно характеризовать атмосферными осадками, выпадающими в периоде вегетации. Теплообеспеченность можно охарактеризовать наибольшими суточными температурами воздуха.

Оперативное состояние посевов оценивалось методом нейросетевой семантической сегментации цветных изображений с оценкой доли дефектных участков.

Численные исследования для предварительного анализа получаемых результатов проводились в среде MS Excel v. 2016.

**Результаты и обсуждение.** Получим аналитическую оценку уровня снижения урожайности с использованием базовых факторов и результатов интеллектуальной оперативной оценки состояния сегментированных сельскохозяйственных полей. Результаты семантической сегментации сельскохозяйственных полей на примере Побединского сельского поселения Быковского района (Волгоградская область) [12] представлены на рисунке.

Для оценки уровня прогнозируемой урожайности с использованием данных минерального питания и тепловлагообеспеченности, а также результатов оперативного мониторинга состояния сельскохозяйственных посевов была разработана нейро-аналитическая модель, учитывающая влияние дополнительных факторов.

Исходная зависимость для оценки потенциальной урожайности от систематизированного набора  $n$  учитываемых факторов, принималась в виде

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \left[ a_i \left( \frac{R_{i\text{opt}} - R_i}{R_i - R_{i(\min, \max)}} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

где  $Y_{\max}$  – биологический максимум оцениваемого значения  $Y$ ;  $a_i$  – коэффициент влияния  $i$ -го фактора внешней среды;  $R_{i\text{opt}}$  – оптимальное значение фактора;  $R_i$ ;  $R_i$  – фактическое значение фактора  $i$ ;  $R_{i(\min, \max)}$  – минимальное (либо максимальное) значения  $i$ -го фактора, при которых урожай погибнет.

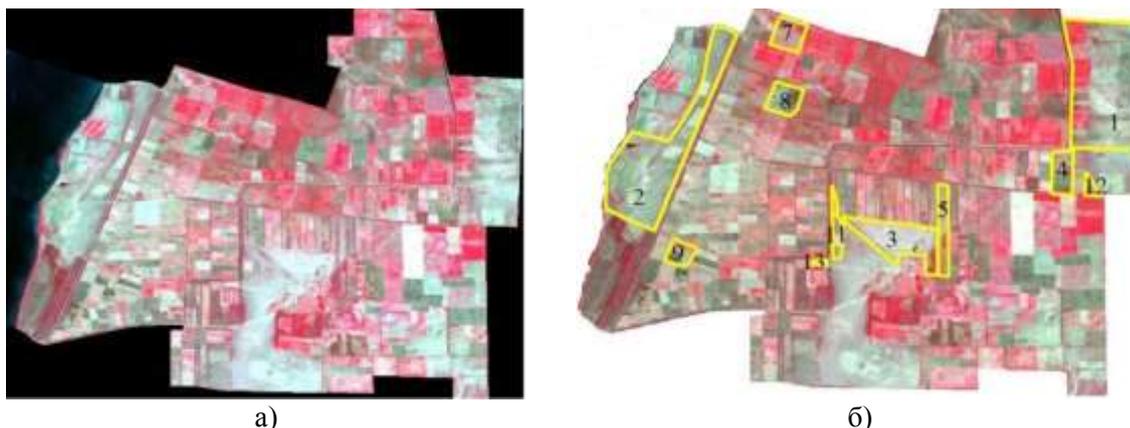


Рисунок – Спутниковые изображения с.-х. полей: а) исходное; б) сегментированное  
Figure – Satellite images of agricultural fields: a) initial; b) segmented

С учетом проведенной верификации с использованием результатах полевых опытов, А. Лихацевичем показано, что полученные им зависимости представляют «действительную математическую модель урожая. Эти зависимости, обобщающие воздействие факторов среды на урожай, можно с успехом применять в любых регионах, а также в других почвенно-климатических условиях» [7].

Факторное моделирование экспериментальных результатов полевого опыта с учетом агротехнологических факторов посредством зависимости (8) позволило получить конкретное уравнение (9) вида

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \exp \left\{ - \left[ a_N \left( \frac{N_{\text{opt}} - N}{N - N_{\min}} \right)^2 + a_W \left( \frac{W_{\text{opt}} - W}{W - W_{\min(\max)}} \right)^2 + a_T \left( \frac{T_{\text{opt}} - T}{T - T_{\min(\max)}} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

где  $N_{\text{opt}}$ ,  $W_{\text{opt}}$ ,  $T_{\text{opt}}$  – оптимальные значения соответственно азота, почвенной влаги и тепла, обеспечивающие биологический максимум урожая;

$N_{\min}$ ,  $W_{\min(\max)}$ ,  $T_{\min(\max)}$  – значения соответственно нормы азота, почвенной влаги и тепла, при которых урожай перестает формироваться.

Параметризованная по данным Н.Н. Семененко [11] зависимость (9) принимает числовой вид

$$Y = 71.4 \cdot \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{100-N}{N+208} \right)^2 + \left( \frac{52-W}{W-3} \right)^2 + \left( \frac{22.5-T_{\max}}{T_{\max}-19} \right)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

По мнению авторов, анализ описанного подхода А. П. Лихацевича к факторному моделированию урожайности позволяет распространить его на  $n$  анализируемых предикторов. Тогда такой подход можно использовать для учета дополнительных, к ранее исследованным, влияющих факторов, в частности состояния сельскохозяйственных полей, оцениваемого по результатам интеллектуального распознавания и семантической сегментации.

В качестве такого дополнительного фактора, совокупно определяющего значение величины урожайности, нами предложено использовать относительную долю  $R_{i, \text{доп}}$  дефектных участков посевов, выявляемую в процессе мониторинга, например с использованием БПЛА или спутниковых снимков [10, 12].

Используя результаты проведенных исследований сегментации вегетативного состояния посевов, дополнительные параметры зависимости (10), адаптированной выражением (11)

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \left[ a_i \left( \frac{R_{i, \text{опт}} - R_i}{R_i - R_{i, (\text{min}, \text{max})}} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

где  $n$  – общее число анализируемых факторов;  $R_{i, \text{опт}} = 0.0$  – значение дополнительного  $i$ -го фактора, выявляемого на поле без дефектов развития растений;  $R_i$  – значение дополнительного  $i$ -го фактора, получаемое по результатам интеллектуальной сегментации;  $R_{d, (\text{min}, \text{max})}$  – значения дополнительного фактора, при котором уборка (транспортировка, обработка, хранение) урожая экономически нецелесообразна.

Тогда диапазон варьирования дополнительного фактора зависимости (11) принимаем в пределах

$$R_i > (0.4 \dots 0.6). \quad (12)$$

Значения урожаяформирующих факторов, на примере ячменя [11], принимались согласно приведенным в таблице 1, а весовые коэффициенты составляли

$$a_N = 1; a_W = 1; a_T = 1.$$

Значения параметров, моделирующих состояние участков с дефектами развития, выбирались следующие:  $a_d = 1$ ;  $R_{d, (\text{min}, \text{max})} = 0.5$ .

Таблица 1 – Значения к расчету урожайности ячменя на удобренных почвах  
Table 1 – Values for calculating the yield of barley on fertilized soils

| Ymax,<br>ц/га | Nopt, кг<br>д.в./га | Nmin, кг<br>д.в./га | Wopt,<br>мм | Wmin,<br>мм | Tmax,<br>град | Tmax(min),<br>град | Rd(min,max) |
|---------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|---------------|--------------------|-------------|
| 71.4          | 100                 | -208                | 52          | 3           | 22.5          | 19                 | 0.4...0.8   |

Адаптированная аналитическая зависимость для оценки прогнозной урожайности принимает вид

$$Y = 71.4 \cdot \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{100-N}{N+208} \right)^2 + \left( \frac{52-W}{W-3} \right)^2 + \left( \frac{22.5-T_{\max}}{T_{\max}-19} \right)^2 + \left( \frac{1.0-R_{i, \text{доп}}}{R_{i, \text{доп}} - R_{d, (\text{min}, \text{max})}} \right)^2 \right] \right\} \quad (13)$$

Отрицательное значение величины д.в. азота ( $N_{\min} = -188$  кг д.в./га) обусловлено тем, что в исследуемой почве еще до внесения азотных удобрений уже содержание азота составляло свыше 188 кг д.в./га ( $N_{\text{почвы}} > N_{\min}$ ).

Результаты оценки урожайности по зависимости (13) показали, что оцениваемое снижение значения прогнозной урожайности ячменя от максимального значения 71.4 ц/га, при величине  $R_{\text{defectn}} = 0.2$ , полученной в процессе интеллектуального сегментирования участка посева, и принятом предельно допустимом значении  $R_{i, \text{доп}} = 0.6$ , составит до 55.6 ц/га, или сократится на 22%.

Отметим, что корректность использования полученной зависимости обосновано в пределах полученных и аппроксимированных значений показателей, используемых в математической модели [8, 9], а также в аналогичных климатических условиях. Огра-

ничения применимости базовой модели, аппроксимированной в условиях фосфорно-калийного фона  $P_{80}K_{120}$ , определяются пределами вариации факторов, описанными в полевых опытах Н. Н. Семененко [11], кг д.в./га:

$$\begin{aligned} 0 < N < 220; \\ 40 < W < 180; \\ 22,0 < T_{\max} < 24,5. \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, оценка уровня снижения урожайности возможна с использованием зависимости (12) на основе результатов интеллектуальной семантической сегментации состояния посевов сельскохозяйственных культур, проводимой по цветным изображениям участков, полученным с применением БПЛА [10].

**Выводы.** 1. Получена нейро-аналитическая модель прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе адаптации факторной зависимости А. Лихацевича, учитывающая, в качестве дополнительного фактора, результаты нейросетевой сегментации изображений участков сельскохозяйственных посевов.

2. Обоснована возможность использования полученной нейро-аналитической модели для оперативной оценки уровня прогнозного снижения урожайности, относительно биологически возможной, с использованием данных минерального питания и тепловлагообеспеченности при программируемом возделывании, а также оперативной оценки результатов нейросетевой сегментации изображений участков сельскохозяйственных полей.

**Conclusions.** 1. A neuro-analytical model for predicting crop yield based on adaptation of A. Likhatchevich's factor dependence was obtained, taking into account, as an additional factor, the results of neural network segmentation of images of agricultural crop sites.

2. The possibility of using the obtained neuro-analytical model for prompt assessment of the level of predicted reduction in yield, relatively biologically possible, using data of mineral nutrition and heat and moisture supply in programmable cultivation, as well as prompt assessment of the results of neural network segmentation of images of agricultural field areas is justified.

#### Библиографический список

1. Сафронова Т. И., Степанов В. И. Математические модели в задачах мелиорации: монография. Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 10 (2). С. 165-166.
2. Хворова Л. А., Топаж А. Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 1 (115).
3. Суханов П. А., Комаров А. А., Полуэктов Р. А. Концептуальная модель базы данных для автоматизированного сбора информации о состоянии полей и посевов. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2013. № 31. С. 91-95.
4. Хворова Л. А. Оптимизация процесса структурно-параметрической идентификации моделей продуктивности агроэкосистем. Известия Алтайского государственного университета. 2012. № 1-1 (73). С. 171-175.
5. Полуэктов Р. А., Топаж А. Г., Якушев В. П., Медведев С. А. Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов. Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 2. С. 7.
6. Четырбоцкий В. А., Четырбоцкий А. Н., Левин Б. В. Математическое моделирование динамики минерального питания растений в системе «удобрение–почва–растение». Биофизика. 2020. Т. 65. № 6. С. 1219–1229.
7. Лихацевич А. П. Математическая модель урожая сельскохозяйственных культур. Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. 2021. Т. 59. № 3. С. 304–318.
8. Рогачев А. Ф. Параметризация эконометрических зависимостей методом наименьших модулей. Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2011. № 3. С. 0421100034.
9. Рогачев А. Ф., Белоусов И. С. Моделирование процесса обучения нейросети DeepLabv3 для сегментации сельскохозяйственных полей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. № 50 (3). С. 142-149.

10. Мелихова Е. В., Мелихов Д. А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве. *Международный журнал прикладных наук и технологий Integral*. 2019. № 3. С. 29.

11. Семененко Н.Н. Торфяно-болотные почвы Полесья: трансформация и пути эффективного использования. Минск: Беларус. навука, 2015. 282 с.

12. Боровой Е. П. Применение космических снимков для выявления неиспользуемых земель в Быковском районе Волгоградской области. Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Великой Отечественной Войне 1941-1945 гг. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2015. Т. 3. С. 369-373.

13. Melikhova E. V., Rogachev A. F., Skiter N. N. Information system and database for simulation of irrigated crop growing. *Studies in Computational Intelligence*. 2019. Vol. 826. Pp. 1185-1191.

### References

1. Safronova T. I., Stepanov V. I. Mathematical models in reclamation problems: monograph. *International Journal of Experimental Education*. 2015. № 10 (2). Pp. 165-166.

2. Khvorova L. A., Topazh A. G. Building models of agroecosystems and their adaptation to specific conditions. *Scientific and technical sheets SPU*. 2011. № 1 (115).

3. Sukhanov P. A., Komarov A. A., Poluektov R. A. Conceptual database model for automated collection of information on the state of fields and crops. *News of St. Petersburg State Agrarian University*. 2013. № 31. Pp. 91-95.

4. Khvorova L. A. Optimization of the process of structural and parametric identification of productivity models of agroecosystems. *News of Altai State University*. 2012. № 1-1 (73). Pp. 171-175.

5. Poluektov R. A., Topazh A. G., Yakushev V. P., Medvedev S. A. Using a dynamic model of the agroecosystem to assess the impact of climatic changes on crop productivity. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2012. № 2. Pp. 7.

6. Chetyrbotsky V. A., Chetyrbotsky A. N., Levin B. V. Mathematical modeling of the dynamics of mineral nutrition of plants in the fertilizer-soil-plant system. *Biophysics*. 2020. V. 65. № 6. Pp. 1219-1229.

7. Likhatchevich A.P. Mathematical model of crop yield. *Weight. Nats. Acad. navuk Belarusi. Ser. agrarian. navuk*. 2021. V. 59. № 3. Pp. 304-318.

8. Rogachev A. F. Parametrization of econometric dependencies by the method of least modules. *Management of economic systems: electronic scientific journal*. 2011. № 3. P. 0421100034.

9. Rogachev A. F., Belousov I. S. Modeling of the process of training the neural network DeepLabv3 for segmentation of agricultural fields. *Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2023. № 50 (3). Pp. 142-149.

10. Melikhova E. V., Melikhov D. A. The use of unmanned aerial vehicles in agricultural production. *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*. 2019. № 3. P. 29.

11. Semenenko N. N. Peat-swamp soils of Polesie: transformation and ways of effective use. Минск: Belarus. navuka, 2015. 282 p.

12. Borovoy E. P. The use of satellite images to identify unused lands in the Bykovsky district of the Volgograd region. Strategic development of the agro-industrial complex and rural territories of the Russian Federation in modern international conditions: materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th anniversary of Victory in the Great Patriotic War of 1941-1945. Volgograd: Volgograd State Agrarian University, 2015. V. 3. Pp. 369-373.

13. Melikhova E. V., Rogachev A. F., Skiter N. N. Information system and database for simulation of irrigated crop growing. *Studies in Computational Intelligence*. 2019. V. 826. Pp. 1185-1191.

### Информация об авторах

**Рогачев Алексей Фруминович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Математическое моделирование и информатика», ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, Волгоград, Университетский пр-т, д. 26), e-mail: rafr@mail.ru

**Мелихова Елена Валентиновна**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Математическое моделирование и информатика», ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, Волгоград, Университетский пр-т, д. 26), e-mail: Mel-v07@mail.ru

**Боровой Евгений Павлович**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Мелиорация земель и комплексное использование водных ресурсов», ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26), e-mail: borovoy.e.p@mail.ru

**Белоусов Илья Станиславович**, аспирант кафедры «Математическое моделирование и информатика», ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, Волгоград, Университетский пр-т, д. 26), e-mail: neznaukaknazvatmail@gmail.com.

**Author's Information**

**Rogachev Aleksey Fruminovich**, Doctor of engineering Sciences, Professor of the Department of mathematical modeling and Informatics, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), e-mail: rafr@mail.ru

**Melikhova Elena Valentinovna**, Candidate of engineering Sciences, associate Professor, head of the Department of mathematical modeling and Informatics, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), e-mail: Mel-v07@mail.ru

**Borovoy Evgeny Pavlovich**, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Land Reclamation and Integrated Use of Water Resources, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetskiy pr., 26), e-mail: borovoy.e.p@mail.ru

**Belousov Pya Sergeevich**, Graduate Student of the Department of mathematical modeling and Informatics, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), e-mail: neznaukaknazvatmail@gmail.com

DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-43

**PERFORMANCE AND UPTIME ASSESSMENT  
LOADER-TRANSPORTER OF HAY ROLLS**

**A. I. Ryadnov<sup>1</sup>, R. V. Lyubimov<sup>1</sup>, A. V. Fedorov<sup>1</sup>, S. M. Voronin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Volgograd State Agrarian University  
Volgograd, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Kalmyk State University  
Elista, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: alex.rjadnov@mail.ru

Received 10.09.2023

Submitted 02.11.2023

**Summary**

The article presents a constructive and schematic diagram of a loader-conveyor of hay rolls designed by the Volgograd State Agrarian University, which is presented in the form of three interconnected systems: chassis, equipment for grabbing and lifting rolls and hydraulic system with drives for grabbing and lifting rolls. From the point of view of the reliability of the unit, its systems are presented as sequentially connected; the results of studies of replaceable productivity and the main indicators of reliability of the loader-conveyor of hay rolls are presented: failure times and the probability of failure-free operation during operation in real conditions of agricultural enterprises.

**Abstract**

**Introduction.** Animal husbandry in the Russian Federation is one of the main branches of agriculture, and cattle breeding is its most important subspecies. The provision of meat and milk to the population of the country cannot be successfully carried out without the availability of the necessary amount of high-quality feed for cattle. The most important feed for cattle is coarse feed, in particular, hay. When harvesting hay, there is a risk of significant losses not only of feed volumes, but also of its quality, which leads to poor productivity of animals. The level of feed quality losses is associated to a greater extent with violations of agro technical deadlines, the fulfillment of which is ensured by the necessary number of machines performing individual technological operations, their high replaceable productivity and a sufficient level of reliability. To increase the productivity and reliability of newly developed machines to the required level, it is important to know the achieved level of these indicators not only in the laboratory, but also in real operating conditions. **The purpose of the work** is to assess the performance and the main indicators of reliability of the experimental sample of the loader-conveyor of hay rolls. **Materials and methods.** In the preparation of this work, materials from open source websites, scientific articles and other publications of scientists from