ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-38

IMPROVING IRRIGATION EFFICIENCY BASED ON INTRODUCING OF DIGITAL MODELS FOR FORECASTING WATER CONSUMPTION

D. A. Solovyev, G.N. Kamyshova, D. A. Kolganov, N. N. Terekhova

Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

Received 09.10.2020

Submitted 02.12.2020

Summary

The article deals with the development of a methodology for predicting total water consumption based on the theory of Chebyshev interpolation of a discretely given function, which allows obtaining more accurate predicted values and, as a result, optimizing irrigation parameters. The developed computer program, which implements the construction of a predictive polynomial, allows it to be integrated into the structure of digital platforms for agribusiness management, such as, for example, Agrosignal, and used for prompt adjustment of irrigation decisions.

Abstract

Introduction. As a result of the insufficient development of the Russian digital agro-technologies market, there are slightly integrated solutions and technologies for increasing productivity based on intellectualization and digitalization. Therefore, the development of new solutions based on mathematical principles and methods for the transition to agriculture of a new formation is a very urgent task.

Object. The object of research is digital models and software for forecasting total water consumption.

Materials and methods. In the presented work, the methods of the theory of Chebyshev interpolation are applied to predict the total water consumption. This approach allows you to obtain more accurate predicted values, as a result of which the parameters are optimized, which provides significant resource savings. The methodology for constructing a predictive indicator of total water consumption based on the problem of the Chebyshev approximation allows us to propose the conducted theoretical studies. **Results and conclusions.** The results of the development of a methodology for constructing a predictive polynomial for predicting total water consumption based on the theory of Chebyshev interpolation of a discretely given function, which allows obtaining more accurate predicted values and, as a consequence, optimizing irrigation parameters, are presented. The developed computer program, which implements the construction of a predictive polynomial, allows it to be integrated into the structure of digital platforms for agribusiness management, such as, for example, Agro-signal and used to promptly adjust irrigation decisions.

Key words: *irrigation optimization, digital platforms, Chebyshev interpolation, digital models, total water consumption, forecasting.*

Citation. Solovyev D.A., Kamyshova G.N., Kolganov D.A., Terekhova N.N. Improving irrigation efficiency based on introducing of digital models for forecasting water consumption. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020.4 (60). 402-414 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-38.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

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

УДК 631.171:631.67

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРОШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Д. А. Соловьев, доктор технических наук, доцент

Г. Н. Камышова, кандидат физико-математических наук, доцент

Д. А. Колганов, кандидат технических наук, доцент

Н. Н. Терехова, кандидат технических наук, доцент

¹*Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, г. Саратов*

Дата поступления в редакцию 09.10.2020

Дата принятия к печати 02.12.2020

Актуальность. Вследствие недостаточного развития российского рынка цифровых агротехнологий на нем присутствуют в незначительной мере интегрированные решения и технологии повышения продуктивности на основе интеллектуализации и цифровизации. Поэтому разработка новых решений на основе математических принципов и методов для перехода к сельскому хозяйству новой формации является весьма актуальной задачей. **Объект исследования** – цифровые модели и программные средства прогнозирования суммарного водопотребления. **Материалы и методы.** В работе рассматривается возможность применения методов теории чебышевской интерполяции при прогнозировании суммарного водопотребления, которое позволяет получать более точные прогнозные значения и, как следствие, позволяет оптимизировать параметры, дает значительную экономию ресурсов. Проведенные теоретические исследования позволяют предложить методу построения прогнозного индикатора суммарного водопотребления на основе задачи чебышевского приближения. **Результаты и выводы.** Приведены результаты разработки методики построения прогнозного полинома для прогнозирования суммарного водопотребления на основе теории чебышевской интерполяции дискретно заданной функции, которая позволяет получать более точные прогнозные значения и, как следствие, оптимизировать параметры орошения. Разработанная компьютерная программа, реализующая построение прогнозного полинома, позволяет интегрировать ее в структуру цифровых платформ для управления агробизнесом, таких, например, как Агросигнал, и использовать для оперативной корректировки решений по орошению.

Ключевые слова: *оптимизация орошения, цифровые платформы, чебышевская интерполяция, цифровые модели водопотребления, суммарное водопотребление, прогнозирование водопотребления.*

Цитирование. Соловьев Д. А., Камышова Г. Н., Колганов Д. А., Терехова Н. Н. Повышение эффективности орошения на основе внедрения цифровых моделей прогнозирования водопотребления. *Известия НВ АУК.* 2020. 4(60). 402-414. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-38.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. По мнению экспертов, российский рынок цифровых технологий развит недостаточно [5]. Выбор технологий незначителен и ограничен. Присутствуют в незначительной мере как интегрированные решения, так и современные технологии повышения производительности сельскохозяйственной сферы на основе современных цифровых технологий интеллектуализации сельскохозяйственных процессов. Вследствие этого сверхактуальной задачей аграрной науки является разработка инновационных принципов и методов для перехода к цифровому аграрному производству.

Эффективное использование водных ресурсов становится все более важным из-за быстрого их истощения, промышленного развития и роста населения и засушливых условий во многих регионах. Суммарное водопотребление является важнейшей характеристикой в гидромелиорации. Несомненна важность расчета величины суммарного водопотребления в поддержании гидрологического цикла в глобальном и континентальном масштабе, а также для эффективного управления орошаемым земледелием. Необходимы улучшенные методы для точной количественной оценки суммарного водопотребления в масштабе поля, водосбора и региона, чтобы повысить эффективность использования водных ресурсов, защитить окружающую среду и качество воды. Точная количественная оценка суммарного водопотребления имеет решающее значение при распределении воды, управлении

ирригацией, экологической оценке и разработке передовых методов управления. Появление и развитие современных инструментов и методов сбора данных, наряду с развитием математического аппарата их анализа, позволяет применять более совершенный математический аппарат прогнозирования количественных характеристик суммарного водопотребления, а с другой – внедрение цифровых платформ для управления агробизнесом, таких, например, как Агросигнал (рисунок 1) позволяет применить эти сложные математические методы и инструменты для управления орошением, повышая его эффективность с точки зрения повышения продуктивности и экономии ресурсов.

Рисунок 1 – Окно программы с треком движения, графиком скорости и режимами работы дождевальной машины

Figure 1 – Program window with a movement track, a speed graph and operating modes of the sprinkler machine

Материалы и методы. Разработка моделей суммарного водопотребления широко распространена в большинстве развитых стран. Наиболее распространен метод Пенмана – Монтейна [10], рекомендованный в качестве базового Международной организацией по продовольствию и сельскому хозяйству ООН. Для применения метода Пенмана – Монтейна необходимо наличие многолетних баз специфических климатических данных с привязкой к геолокации местности, которые не всегда доступны. Помимо этого, биологические особенности сельскохозяйственных культур этот метод учитывает недостаточно. Учитывая вышесказанное, а также большую диверсификацию почвенно-климатических ресурсов России, применение метода Пенмана – Монтейна здесь достаточно сложно. В этой связи научно-исследовательскими организациями и учеными нашей страны были разработаны и нашли широкое распространение на практике другие методы определения суммарного водопотребления [6].

Прогнозирование суммарного водопотребления, как правило, происходит с применением классических регрессионных методов. Применение предлагаемых нами методов теории чебышевской интерполяции позволяет получать более точные прогнозные значения суммарного водопотребления, что позволяет оптимизировать параметры орошения и приводит к экономии ресурсов. Целью исследований является прогнозирование суммарного водопотребления на основе методики построения ее прогнозного полинома методами чебышевской интерполяции дискретно заданной функции.

В качестве стандарта в методике расчетов суммарного водопотребления (ET_o) международной организацией по продовольствию и сельскому хозяйству Организации Объединенных Наций рекомендуется метод Пенмана-Монтейна (1):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 d_a}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)}, \quad (1)$$

где описание входных параметров (γ , R_n , T и т.д.) уравнения (1) может быть найдено в [10].

Нами рассматриваются методы российских ученых. В их основе стоит зависимость суммарного водопотребления от температуры и влажности воздуха [3].

Согласно методу Алпатьевых, суммарное водопотребление вычисляется по следующей формуле [3]:

$$ET = k_{\text{бк}} \sum d. \quad (2)$$

Согласно методу Льгова, суммарное водопотребление вычисляется по следующей формуле [3]:

$$ET = k_{\text{бф}} \sum t, \quad (3)$$

где $k_{\text{бк}}$, $k_{\text{бф}}$ – биоклиматический и биофизический коэффициенты соответственно. В практике применения в России эти методы получили широкое распространение.

Наряду с вышеприведенными методами расчета суммарного водопотребления, существуют и другие, разработанные учеными разных стран [7]. В качестве примера современных подходов можно отметить оценку водопотребления с помощью спутников [9], которая имеет большой потенциал для планирования водных ресурсов и оценки использования воды в сельском хозяйстве. А также применение современных технологий машинного обучения [11] и искусственных нейронных сетей [8]. Прогнозирование суммарного водопотребления, вне зависимости от методики расчета, во многих случаях происходит с применением классических регрессионных методов. Нами предлагается за основу прогнозирования взять более совершенный математический аппарат теории чебышевской интерполяции. По сравнению с регрессионными и среднеквадратичным способами приближения способ чебышевской интерполяции является наиболее эффективным и универсальным и обладает особым свойством не только получать высокую точность приближения в точках дискретного представления функциональных зависимостей, но и обеспечивать требуемую гарантированную точность приближения.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим данные количественной оценки суммарного водопотребления ET , рассчитанной одним из методов, в течение вегетационного периода. За начало периода принимаем третью декаду апреля, за окончание – вторую декаду октября. Таким образом, значения суммарного водопотребления ET можно задать в виде дискретного ряда:

Таблица 1 – Значения суммарного водопотребления ET

Table 1 – Values of total water consumption ET

T	T_1	T_2		T_N
Z	Z_1	Z_2		Z_N

Здесь T – декады, пронумерованные в порядке возрастания от 1 – третья декада апреля, 2 – первая декада мая и т. д. до N – вторая декада октября, а $Z_k = F(T_k)$, $k = 0, 1, \dots, N$ – значение суммарного водопотребления в соответствующей декаде

Рассмотрим постановку проблемы чебышевского приближения функции полиномом в общей постановке.

Таблицей своих значений $Z_k = F(T_k)$, $k = 0, 1, \dots, N$ (таблица 1) зададим некоторую функцию $F(T)$.

Временные интервалы расположим в порядке возрастания $T_1 < T_2 < \dots < T_N$.

$P_n(\vec{a}, T) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin i * T$ – тригонометрический полином порядка $n \leq N$
Введем характеристику близости полинома к таблице, задаваемую формулой:

$$\rho(\vec{a}) = \max_k |Z_k - P_n(\vec{a}, T)|. \quad (4)$$

Обозначим:

$$\max_{\vec{a}} \rho(\vec{a}) = \delta, \quad (5)$$

при фиксированном n . В этом случае полином, для которого выполняется условие:

$$\rho(\vec{a}^*) = \delta, \quad (6)$$

будет полиномом наилучшего приближения таблицы $\{T_k, Z_k\}$.

Остановим рассмотрение на проблеме чебышевского интерполирования, которая возникает в случае, когда количества значений таблицы равно порядку полинома, увеличенному на единицу. В [1] показано, что проблему (5) можно решать через редукцию к задаче линейного программирования.

А именно, обозначим:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (a_0, a_1, \dots, a_n) \in R^{n+1}, \\ B_i &= (1, \sin T_i, \sin 2T_i, \dots, \sin nT_i) \in R^{n+1}, \\ b_i &= -Z_i, i \in [1: N]. \end{aligned}$$

Тогда можно $P_n(\vec{a}, T)$ записать в виде:

$$P_n(\vec{a}, T) = \langle \vec{a}, (1, \sin T, \sin 2T, \dots, \sin nT) \rangle,$$

а задачу (6) можно записать в виде:

$$\max_{i \in [1: 2N]} \{ \langle B_i, \vec{a} \rangle + b_i \} \rightarrow_{\vec{a} \in R^{n+1}} \min. \quad (7)$$

В этом случае задача (5) может быть записана как следующая задача линейного программирования, которой она эквивалентна:

$$\begin{cases} a_{n+1} \rightarrow \min \\ a_{n+1} - \langle B_i, \vec{a} \rangle - b_i \geq 0, i \in [1: N] \end{cases}. \quad (8)$$

Решаем оптимизационную задачу:

$$\min_{\vec{a}} \{ \max_{i+1 \leq k \leq i+m} |Z_k - P_n(\vec{a}, T)| \}. \quad (9)$$

Пусть вектор коэффициентов $\vec{a}_i^*$ является решением задачи (9), $P_n(\vec{a}, T) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin i * T$.

Методика построения прогнозного полинома на основе задачи чебышевского приближения состоит в следующем: по таблично заданным значениям суммарного водопотребления ET (в таблице это Z) в соответствии с декадами вегетационного периода T (таблица 1) по алгоритму, приведенному на рисунке 2, строится прогнозный полином.

Рисунок 2 – Алгоритм построения прогнозного полинома суммарного водопотребления

Figure 2 – Algorithm for constructing a predictive polynomial of total water consumption

Реализацию предложенного алгоритма интерполяции будем осуществлять на примере люцерны. Люцерна занимает одно из ведущих мест по кормовым качествам среди кормовых культур, и при выращивании на орошении ее урожайность можно повысить в два раза.

Проведем вычислительные эксперименты, используя программу, реализующую получение значений коэффициентов полиномов на основе решения задачи чебышевского приближения. Данная программа была реализована в среде Matlab [12] и применялась также для исследования динамики фондового рынка (например, [2]). Реализация алгоритма в среде Matlab приведена на рисунке 3.

Рисунок 3 – Реализация алгоритма в среде Matlab

Figure 3 – Implementation of the algorithm in the Matlab

Построение прогнозного полинома. Задаем таблицу значений $Z_k = Z(T_k)$, $k \in [1: N]$ суммарного водопотребления ET люцерны в декады T_k вегетационного периода, пронумерованные в порядке возрастания. При этом T_1 – третья декада апреля, T_{18} – вторая декада октября. Данные приведены для Саратовской области [4].

Таблица 2 – Численные значения суммарного водопотребления ET

Table 2 – Numerical values of total water consumption ET

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y	11,78	15,8	28,1	54,3	67,1	22,5	31,8	33,1	37,3
t	10	11	12	13	14	15	16	17	18
y	44,2	18,2	24	25,2	28,6	39	18,4	7,8	7,5

На основе приведенной методики возможно построение прогнозного полинома по всему вегетационному периоду. Однако, как известно [8], по мере развития люцерны ее среднесуточное водопотребление растет. Так, если в период «отрастание – ветвление» показатель составляет 10–30 м³/га, то в период «ветвление – бутонизация» это уже 30–50 м³/га, а в период «бутонизация – цветение» достигает 50–70 м³/га. На величину суммарного водопотребления люцерны также оказывают влияние укусы. Так, первый укус имеет самое высокое водопотребление и составляет 36,3 – 38,7 % от суммарного, в то время как второй и третий уже 31,1 – 33,1 % и 27,5 – 28,9 % от суммарного соответственно [4].

То есть у люцерны значение суммарного водопотребления существенно зависит от стадий развития и укусов, и таким образом, для большей точности желательно рассматривать более короткие промежутки при построении прогнозного полинома. Помимо этого, значение суммарное водопотребление зависит от климатических условий. В связи с этим нами рассмотрены числовые параметры для лет с различной климатической характеристикой: средне-засушливые $У_{сз}$ и умеренно-увлажненные $У_{ув}$.

Проведем анализ для двух периодов 1-5-й ($t_1 - t_5$) и 6-10-й ($t_6 - t_{10}$).

Вначале построим график функции y (суммарного водопотребления ET) совместно с графиком уравнения линейной регрессии на промежутке (рисунок 4).

Рисунок 4 – График функции суммарного водопотребления $ET(y)$ совместно с уравнением линейной регрессии

Figure 4 – Graph of the function of total water consumption $ET(y)$ together with the linear regression equation

В качестве прогнозных полиномов будем рассматривать тригонометрические полиномы первой степени $P = a_0 + a_1 \sin t$ и второй степени $Q = a_0 + a_1 \sin t + a_2 \sin 2t$. Как показывает практика, увеличение степени полинома приводит лишь к увеличению объема вычислений без улучшения точности прогноза.

Проведя численные эксперименты по предложенной методике, находим, что для указанного периода прогнозные полиномы первой и второй степени соответственно для среднезасушливых лет имеют вид:

$$P = 34,08 - 23,3 \sin t,$$

$$Q = 34,39 - 33,14 \sin t - 0,67 \sin 2t.$$

Для умеренно-увлажненных:

$$P = 30,29 - 20,4 \sin t,$$

$$Q = 30,5 - 27 \sin t - 0,5 \sin 2t.$$

Аналогично проведем численные эксперименты по предложенной методике для 6-10-го периодов. Находим, что для указанного периода прогнозные полиномы первой и второй степени соответственно для среднезасушливых лет имеют вид:

$$P = 50,9 - 22,46 \sin t,$$

$$Q = 40,3 - 8,7 \sin t + 0,25 \sin 2t.$$

Для умеренно-увлажненных:

$$P = 48,6 - 16,7 \sin t,$$

$$Q = 38,3 - 3,4 \sin t + 0,28 \sin 2t.$$

Графики суммарного водопотребления ET совместно с графиками прогнозных полиномов первой (P) и второй (Q) степени для средnezасушливых (y_{c3}) лет приведены на рисунке 5. Значения приведены для 1-5-го периодов и 6-10-го периодов (декады вегетационного периода, пронумерованные в порядке возрастания) соответственно.

Рисунок 5 – Графики суммарного водопотребления ET совместно с графиками прогнозных полиномов первой (P) и второй (Q) степени для средне-засушливых (y_{c3}) лет, период 1-5-й (сверху), 6-10-й (снизу)

Figure 5 – Graphs of total water consumption ET together with graphs of predictive polynomials of the first (P) and second (Q) degree for medium-dry (y_{c3}) years, period 1-5th (top), 6-10th (bottom)

Графики суммарного водопотребления ET совместно с графиками прогнозных полиномов первой (P) и второй (Q) степени для умеренно-увлажненных ($y_{ув}$) лет приведены на рисунке 6. Значения приведены для 1-го периодов и 6-10-го периодов (декады вегетационного периода, пронумерованные в порядке возрастания) соответственно.

Рисунок 6 – Графики суммарного водопотребления ET совместно с графиками прогнозных полиномов первой (P) и второй (Q) степени для умеренно-увлажненных ($y_{ув}$) лет, период 1-5-й (сверху), 6-10-й (снизу)

Figure 6 – Graphs of total water consumption ET together with graphs of predictive polynomials of the first (P) and second (Q) degrees for moderately humidified ($y_{ув}$) years, period 1-5th (top), 6-10th (bottom)

Проведя анализ полученных результатов, находим, что для периода 1-5-й суммарные отклонения прогнозных полиномов первой степени от фактических значений суммарное водопотребление на 4-8 % меньше, соответствующих суммарных отклонения прогнозных полиномов второй степени и на 6-12 % меньше суммарных отклонений от расчетного значения суммарное водопотребление, вычисленной по другим методикам. Таким образом, для этого периода в качестве прогнозного полинома целесообразно выбирать полином первой степени, вычисляя его коэффициенты по предложенной методике.

Для периода же 6-10-й суммарные отклонения прогнозных полиномов первой степени от фактических значений суммарное водопотребление на треть больше соответствующих суммарных отклонения прогнозных полиномов второй степени. Суммарные отклонения от расчетного значения суммарное водопотребление, вычисленной по другим методикам больше чем, суммарные отклонения прогнозных полиномов второй степени и меньше, чем у полиномов первой степени. Таким образом, для этого периода

в качестве прогнозного полинома целесообразно выбрать полином второй степени. Представленные на рисунках 5 и 6 графики зависимостей хорошо демонстрируют это. Причем, как мы можем видеть, прогнозная тенденция сохраняется для лет различной влажности (в нашем примере среднезасушливых и умеренно-увлажненных лет), коэффициенты полиномов будут различными.

Выводы. Предложена методика построения прогнозного полинома для прогнозирования суммарного водопотребления на основе теории чебышевской интерполяции дискретно заданной функции. Сопоставляя результаты предложенной методики прогнозирования с классическими статистическими методами можно видеть лучшую точность прогноза. Это в свою очередь указывает на правильность принятой методики и достоверность полученных зависимостей. Данная методика может быть распространена на различные климатические условия и сельскохозяйственные культуры с сохранением точности приближения.

На основе предложенного алгоритма разработана программа (в среде Matlab), реализующая получение значений коэффициентов полиномов, что позволяет интегрировать ее в структуру цифровых платформ для управления агробизнесом, таких, например, как Агросигнал и использовать для оперативной корректировки решений по орошению.

Библиографический список

1. Выгодчикова И. Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной регрессии по минимаксному критерию // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 4(58). С. 105-116.
2. Выгодчикова И. Ю. Инструментарий принятия решений на основе применения минимаксного индикатора для интервальных данных динамики фондового рынка // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 2(74). С. 109-119.
3. Определение суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур в аридных зонах / В. В. Корсак [и др.] // Научная жизнь. 2016. № 1. С. 41-51.
4. Панкова Т. А. Исследование изменчивости биоклиматических коэффициентов люцерны от влагообеспеченности сельскохозяйственного поля // Научная жизнь. 2014. № 4. С. 43-49.
5. Труфляк Е. В., Курченко Н. Ю., Дидич В. А. Цифровые технологии в АПК // Сельский механизатор. 2018. № 7-8. С. 13-14.
6. Черемисинов А. А., Черемисинов А. Ю. Обзор расчетных методов определения суммарного испарения орошаемых сельскохозяйственных полей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1(21). С. 113-133.
7. Ahooghalandari M., Khiadani M., Jahromi M. E. Developing equations for estimating reference evapotranspiration in Australia // Water Resources Management. 2016. V. 30 (11). P. 3815-3828.
8. Antonopoulos V. Z., Antonopoulos A. V. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. № 132. P. 86-96.
9. Automated calibration of the METRIC-Landsat evapotranspiration process / R. G. Allen [et al.] // Journal of the American Water Resources Association. 2013. V. 49(3). P. 563-576.
10. Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.htm>.
11. Dou X., Yang Y. Evapotranspiration estimation using four different machine learning approaches in different terrestrial ecosystems // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. № 148. P. 95-106.
12. Matlab. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

Conclusions. A technique for constructing a predictive polynomial for predicting total water consumption based on the theory of Chebyshev interpolation of a discretely given function is proposed. Matching the results of the projected forecasting technique with classical

statistical methods, one can see the best forecast accuracy. This, in turn, indicates the correctness of the adopted methodology and the reliability of the dependences obtained. This technique can be extended to various climatic conditions and crops with the preservation of approximation accuracy and used to promptly adjust irrigation regimes.

Based on the proposed algorithm, a program has been developed (in the Matlab) that implements obtaining the values of the coefficients of polynomials, which allows it to be integrated into the structure of digital platforms for agribusiness management, such as, for example, Agrosignal, and used for prompt adjustment of irrigation decisions.

Reference

1. Vygodchikova I. Yu. Algorithm for estimating the parameters of linear multiple regression using the minimax criterion // *Applied Informatics*. 2015. V. 10. № 4 (58). P. 105-116.
2. Vygodchikova I. Yu. Decision-making toolkit based on the use of a minimax indicator for interval data of the stock market dynamics // *Applied Informatics*. 2018. Vol. 13. № 2 (74). P. 109-119.
3. Determination of the total water consumption of agricultural crops in arid zones / V. V. Korsak [et al.] // *Scientific life*. 2016. № 1. P. 41-51.
4. Pankova T. A. Investigation of variability of bioclimatic coefficients of alfalfa from moisture supply of an agricultural field // *Scientific life*. 2014. № 4. P. 43-49.
5. Truflyak E. V., Kurchenko N. Yu., Didich V. A. Digital technologies in the agro-industrial complex // *Rural mechanic*. 2018. № 7-8. P. 13-14.
6. Cheremisinov A. A., Cheremisinov A. Yu. Review of calculation methods for determining the total evaporation of irrigated agricultural fields // *Scientific journal of the Russian Research Institute of Melioration Problems*. 2016. № 1 (21). P. 113-133.
7. Ahooghalandari M., Khiadani M., Jahromi M. E. Developing equations for estimating reference evapotranspiration in Australia // *Water Resources Management*. 2016. V. 30 (11). P. 3815-3828.
8. Antonopoulos V. Z., Antonopoulos A. V. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. № 132. P. 86-96.
9. Automated calibration of the METRIC-Landsat evapotranspiration process / R. G. Allen [et al.] // *Journal of the American Water Resources Association*. 2013. V. 49(3). P. 563-576.
10. Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation. [Electronic resource], access mode: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.html>.
11. Dou X., Yang Y. Evapotranspiration estimation using four different machine learning approaches in different terrestrial ecosystems // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. № 148. P. 95-106.
12. Matlab. [Electronic resource], access mode: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

Authors Information

Solovyev Dmitry Aleksandrovich, Acting Rector, Dean of the Faculty of Engineering and Environmental Engineering, Head of the Department of Technosphere Safety and Transport and Technological Machines, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: rector@sgau.ru.

Kamyshova Galina Nikolaevna, Head of the Department of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: gkami-chova@mail.ru.

Kolganov Dmitry Alexandrovich, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Transport and Technological Machines, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), candidate of technical sciences, e-mail: dmi.kolg@mail.ru.

Terekhova Nadezhda Nikolaevna, Associate Professor of the Department of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: nterehova2015@yandex.ru.

Информация об авторах

Соловьев Дмитрий Александрович, врио ректора, декан факультета Инженерии и природообустройства, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), доктор технических наук, доцент, e-mail: rector@sgau.ru .

Камышова Галина Николаевна, заведующий кафедрой «Математика, механика и инженерная графика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: gkami-chova@mail.ru.

Колганов Дмитрий Александрович, доцент кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), кандидат технических наук, e-mail: dmi.kolg@mail.ru

Терехова Надежда Николаевна, доцент кафедры «Математика, механика и инженерная графика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nterehova2015@yandex.ru.