

Оригинальная статья

УДК 631.67

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-28-35



АДАПТИВНОЕ НОРМИРОВАНИЕ ОРОШЕНИЕМ

Панкова Татьяна Анатольевна , канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4619-765X>; vtanja@mail.ru, pankova-sgau@yandex.ru

Кравчук Алексей Владимирович, д-р техн. наук, профессор

<https://orcid.org/0000-0002-5692-8655>; aleks100sgau@yandex.ru

Орлова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-9350-0893>; orlovass77@mail.ru

Михеева Ольга Валентиновна, канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0001-7375-028>; omuk@inbox.ru

Миркина Елена Николаевна, канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-3867-1937>; docentmirkina@rambler.ru

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема широкого развития орошения на территории Саратовского Заволжья, что привело к ухудшению мелиоративного состояния земель, которое можно приостановить путем разработок совершенного нормирования орошения путем автоматизированных программ. Поэтому актуальным является вопрос повышения эффективности нормирования орошения путем определения общего водопотребления растений с учетом водного режима почвы, состояния деятельной поверхности, метеоусловий и биологических особенностей культуры. В статье приводятся математические зависимости, применяемые для разработки автоматизированной системы адаптивного нормирования орошения на примере культуры люцерны в условиях сухостепного Заволжья Саратовской области. При выборе метода определения испарения было проведено сравнение результатов расчета испарения по методам Н.Н. Иванова и метода Будыко-Зубенок. Приводятся известные зависимости динамики водного режима расчетного слоя почвы, водопотребления, коэффициентов, характеризующих биологические особенности культуры в процессе роста и развития, состояния активной поверхности, расчетной нормы полива, условие поддержания запасов влаги активного слоя почвы в оптимальном диапазоне, обеспечивающего минимальную потерю воды и оптимальное влагообеспечение культуры, заложенные в основу автоматизированной расчетной программы адаптивного нормирования орошением. Адаптивное нормирование орошением заключается в определении суммарного водопотребления сельскохозяйственной культурой с учетом водного режима почвы, состояния деятельной поверхности, метеорологических сведений и биологических характеристик растения (культуры). Предложена программа адаптивного регулирования полива на примере культуры люцерны, которая позволит повысить эффективность использования оросительной воды на территории Саратовского Заволжья и, как результат, позволит улучшить экологическую ситуацию в данном регионе.

Ключевые слова: нормирование, орошение, культура, модель, адаптация, теория, зависимости, факторы, водопотребление, испарение, влажность

Формат цитирования: Панкова Т.А., Кравчук А.В., Орлова С.С., Михеева О.В., Миркина Е.Н. Адаптивное нормирование орошением // Природообустройство. 2023. № 2. С. 28-35. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-28-35.

© Панкова Т.А., Кравчук А.В., Орлова С.С., Михеева О.В., Миркина Е.Н., 2023

Original article

ADAPTIVE IRRIGATION RATIONING

Pankova Tatyana Anatolievna , candidate of technical sciences, associate professor

<https://orcid.org/0000-0002-4619-765X>; vtanja@mail.ru, pankova-sgau@yandex.ru

Kravchuk Alexey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor

<https://orcid.org/0000-0002-5692-8655>; aleks100sgau@yandex.ru

Orlova Svetlana Sergeevna, candidate of technical sciences, associate professor

<https://orcid.org/0000-0002-9350-0893>; orlovass77@mail.ru

Mikheeva Olga Valentinovna, candidate of technical sciences, associate professor

<https://orcid.org/0000-0001-7375-0281>; omuk@inbox.ru

Markina Elena Nikolaevna, candidate of technical sciences, associate professor

<https://orcid.org/0000-0003-3867-1937>; docentmirkina@rambler.ru

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

Annotation. This article deals with the problem of the widespread development of irrigation in the territory of the Saratov Trans-Volga region, which led to the deterioration in the reclamation state of lands, which can be suspended by developing perfect irrigation rationing through automated programs. Therefore, the issue of increasing the efficiency of irrigation rationing by determining the total water consumption of plants, taking into account the water regime of the soil, the state of the active surface, weather conditions and biological characteristics of the crop is relevant. The article presents mathematical dependencies used to develop an automated system for adaptive irrigation rationing on the example of alfalfa culture in the conditions of the dry steppe Trans-Volga area of the Saratov region. When choosing a method for determining evaporation, a comparison was made of the results of calculating evaporation using the methods of N.N. Ivanov and the Budyko-Zubenok method. The known dependences of the dynamics of the water regime of the calculated soil layer, water consumption, coefficients characterizing the biological characteristics of the crop in the process of growth and development, the state of the active surface, the calculated irrigation rate, the condition for maintaining the moisture reserves of the active soil layer in the optimal range, ensuring minimal water loss and optimal moisture supply of the crop are given that form the basis of the automated calculation program for adaptive rationing by irrigation. Adaptive rationing by irrigation consists in determining the total water consumption by an agricultural crop, taking into account the water regime of the soil, the state of the active surface, meteorological information and the biological characteristics of the plant (crop). A program of adaptive irrigation regulation is proposed on the example of a crop – alfalfa, which will improve the efficiency of irrigation water use in the Saratov Trans-Volga region, and as a result will improve the ecological situation in this region.

Keywords: rationing, irrigation, culture, model, adaptation, theory, dependencies, factors, water consumption, evaporation, humidity

Format of citation: Pankova T.A., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mikheeva O.V., Mirkina E.N. Adaptive irrigation rationing // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 2. S. 28-35. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-28-35.

Введение. Главным ресурсом поддержания эффективности мелиорируемых земель при выращивании сельскохозяйственных культур в степной и сухостепной зонах служит орошение, но его масштабное развитие нередко приводит к таким экологическим неблагоприятным ситуациям, как повышение уровня грунтовых вод, понижение плодородия земель, засоление почвы, возникновение водной эрозии. Перечисленные отрицательные процессы являются результатом того, что в структуре водопотребления при орошении происходит непроизводительная потеря воды (50-60% от водозабора). Недостаток естественной влаги в степной и сухостепной зонах негативно сказывается на устойчивости сельскохозяйственного производства. Важным средством повышения продуктивности в зоне

недостаточного увлажнения наряду с использованием научно обоснованных систем сухого земледелия является орошение, позволяющее оптимизировать водный режим почвы, уменьшить дефицит воды в агроценозах и нейтрализовать последствия засух. Это определило расширение площади орошаемых земель в мире. Сухостепное Заволжье находится в зоне рискованного земледелия, где возделывать сельскохозяйственные культуры без орошения невозможно. В то же время широкое развитие ирригации в 1980-е гг. привело к резкому ухудшению экологической ситуации в нашем регионе.

Снижение мелиоративного состояния земель является результатом низкого качества управления орошения. Как отмечают А.В. Кравчук, Н.А. Пронько, В.В. Корсак,

А.С. Фалькович [1, 2] и другие ученые, ошибка была допущена еще в начале широкой ирригации сельскохозяйственных земель области. Известно также, что большое количество оросительных систем функционирует не в проектных режимах, и нагрузки на мелиоративные земли превышают допустимые. Причиной такого неблагоприятного состояния орошаемых земель и низкой урожайности орошаемых культур может быть несовершенное регулирование орошения, при котором определение общего водопотребления осуществляется лишь с учетом биологических свойств растения и погодных условий, учитываемых для конкретных условий среды. Использование такой модели для оценки влияния влагообеспеченности сельскохозяйственного поля на величину общего водопотребления направлено только на получение максимального урожая и приводит к перерасходу воды.

Управление водным режимом орошаемых земель, безусловно, сопряжено с определенными трудностями, но современный уровень средств вычислительной техники, применяемых компьютерных технологий позволяет преодолевать эти трудности и применять методы математического моделирования для управления процессами при орошении сельскохозяйственных культур путем разработанных компьютерных программ. Решение проблемы может быть также достигнуто путем адаптивного нормирования орошения, основанного на определении общего водопотребления с учетом складывающегося водного режима почвы, состояния активной поверхности, погодных условий, биологических особенностей растений и направленного на получение заданного урожая культуры.

Современный уровень развития компьютерных технологий, методов математического моделирования и вычислительной техники позволяет применять для оперативного управления орошением математические модели на основе расчетных зависимостей воднобалансового метода. Эффективность управления при их использовании зависит от того, насколько реально они отражают фактическую динамику водного режима посевов, достоверно оценивают величины суммарного испарения и другие элементы водного баланса.

Цель исследований: повышение эффективности использования оросительной воды путем адаптивного нормирования полива люцерны для условий сухостепного Заволжья.

Материалы и методы исследований. В результате проведенного анализа работ российских и зарубежных ученых было установлено,

что результатом увеличения технического уровня систем гидромелиорации может быть решено от 30 до 40% актуальных экологических проблем, другая же часть может быть устранена лишь за счет повышения эффективности управления водными ресурсами. Однако всем известно, что управление водным режимом орошаемых земель связано с множеством трудностей. Это объясняется тем, что динамика влагообеспеченности посевов напрямую зависит от большого количества случайных и непредсказуемых факторов. Однако новый этап развития возможностей цифровой вычислительной техники и компьютерных технологий позволяет преодолевать сложившиеся трудности и применять методы математического моделирования для управления технологическими процессами при орошении. Серьезные проблемы, вызванные неправильным подходом в орошении, не позволяют отказаться от ирригации, так как альтернативы орошения на территории нашей области быть не может. Можно лишь приостановить дальнейшее снижение плодородия почвы, попытаться обеспечить и повысить сельскохозяйственное производство, снизить себестоимость сельскохозяйственной продукции путем рационального использования воды, адаптивного размещения сельскохозяйственных культур, а именно выращивать такие культуры, которые будут расходовать большее количество влаги. Это в свою очередь будет приводить к понижению уровня грунтовых вод и снижению содержания солей, тем самым – к уменьшению площади засоления поливных земель.

Прогнозированием водно-солевого режима занимались А.С. Фалькович, Н.А. Пронько [3]. На территории Саратовского Заволжья такой культурой является люцерна. Именно на примере этой культуры будет адаптирована модель С.В. Затицацкого [4], разработанная для условий сухостепного Заволжья.

Растение-культура в процессе своего роста и развития напрямую зависит от водопотребления [5, 6], которое зависит в свою очередь от водного режима почвы, воздушного режима почвы, температурного режима и режима питания. Известна зависимость общего водопотребления сельскохозяйственной культуры, показывающая, что общий расход воды является функцией от климатических факторов, запасов влаги в почве и биологических характеристик растения-культуры [7, 8].

Прежде всего потребление воды растением напрямую зависит от испарения с орошаемого поля, подстилающая поверхность которого

существенно изменяется в вегетационный период роста и развития культуры. Для выбора точной методики определения испарения было проанализировано два метода: метод Н.Н. Иванова и метод Будыко-Зубенко.

Метод, предложенный Н.Н. Ивановым, показывает, что испарение зависит от температуры воздуха и относительной влажности:

$$E = 0,0018(25 + t)^2 (100 - \phi), \quad (1)$$

где t – температура воздуха, °С; ϕ – относительная влажность, %.

Метод определения испарения по Будыко-Зубенко представляет собой графический метод, выражающийся в криволинейных зависимостях (рис. 1) испарения и недостаточной влажности воздуха, рассчитанного по месяцам. Криволинейные зависимости описываются уравнением:

$$E = ad_{\phi}^3 - bd_{\phi}^2 + cd_{\phi} + k, \quad (2)$$

где E – испарение, мм; d_{ϕ} – недостаточная влажность воздуха, мБ; a, b, c, k – эмпирические коэффициенты.

Сравнение результатов расчета испаряемости по методу Будыко-Зубенко и методу Н.Н. Иванова показывает, что более точные коэффициенты для условий сухостепного Заволжья получены по методу Будыко-Зубенко (рис. 2).

За время своего роста и развития культура люцерны потребляет различное количество влаги. Например, в период посева до отрастания подстилающую поверхность характеризуют как открытую поверхность почвы, в процессе роста культуры изменяющую свое состояние и оказывающую влияние на влажность почвы, которая должна находиться в определенных пределах в течение каждой фазы растения-культуры. Это является основным параметром при нормировании орошения.

Для поддержания оптимальной влажности почвы и получения необходимого урожая следует стремиться к рациональному и экономному расходу поливной воды путем контроля нормирования орошения при снижении топливно-энергетических ресурсов на орошение. Как считают Т.И. Сафронова и В.И. Степанов [9], основным технологическим критерием контроля нормирования поливов является динамика содержания влаги в активном слое почвы, на изменчивость которой влияют структура корневой системы,

плотность почвы, пористость почвы, величина увлажнения почвы в результате орошения и выпадения осадков, глубина залегания грунтовых вод и природно-климатические условия места возделывания культуры.

Действительное наличие влаги в определенном слое почвы определяется экспериментально. Затем проводится интерполяция значения влажности почвы с учетом орошения и осадков, затем определяется среднее значение запасов влаги за необходимый временной интервал. Динамика водного режима расчетного слоя почвы описывается известным уравнением:

$$W_k = W_n + P + \sum m \pm q - ET, \quad (3)$$

где W_k – запасы влаги в почве на конец расчетного периода, мм; W_n – запасы влаги в почве на начало расчетного периода, мм; P – количество осадков, мм; $\sum m$ – сумма поливных норм, мм; q – влагообмен активного слоя почвы с подстилающими грунтами, мм.

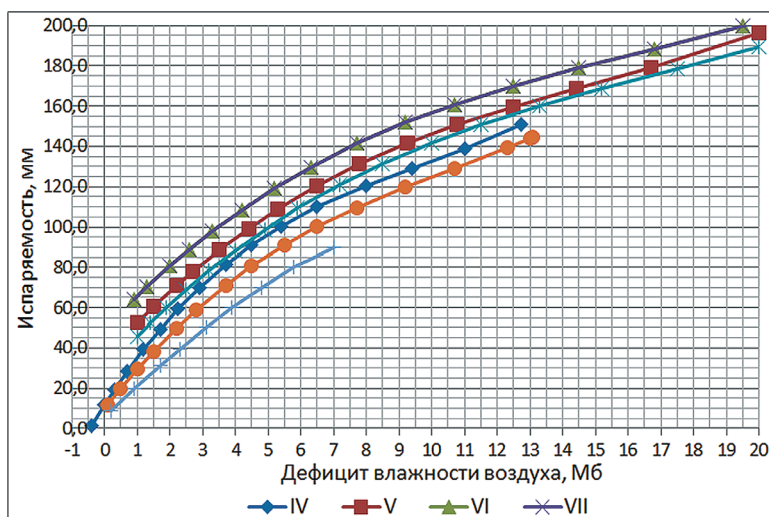


Рис. 1. График зависимости испарения от недостатка влажности воздуха для степной зоны по месяцам года

Fig. 1. Graph of the dependence of evaporation on the lack of air humidity for the steppe zone by months of the year



Рис. 2. Сравнение коэффициентов, рассчитанных по методам Н.Н. Иванова и Будыко-Зубенко

Fig. 2. Comparison of coefficients calculated by the methods of N.N. Ivanov and Budyko – Zubenok

Вместе с определением необходимых для растения запасов влаги в почве определяется водопотребление по модели, предложенной С.В. Затищным [10] и разработанной для условий сухостепного Заволжья. Она учитывает водный режим почвы, погодные условия, биологические особенности растения-культуры и состояние активной поверхности почвы:

$$ET = \frac{E \cdot A_n}{\left(1 + 10^{\gamma - \beta \frac{W_{act} - W_{pwp}}{W_{FC} - W_{pwp}}}\right)}, \quad (4)$$

где ET – общий расход воды, мм; E – испарение, мм; W_{act} – фактические запасы влаги, мм; W_{pwp} – запасы влаги почвы, соответствующие влажности увядания, мм; W_{FC} – запасы влаги почвы, соответствующие наименьшей влагоемкости, мм; A_n , γ и β – эмпирические коэффициенты, определяющие состояние активной поверхности и биологических особенностей культуры в процессе роста и развития, которые определяются по зависимостям:

$$\beta = \frac{\sum \left(lq \frac{A_n}{ET/E} - 1 \right) \cdot \sum W}{n} - \sum W \cdot lq \left(\frac{A_n}{ET/E} - 1 \right); \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\sum lq \left(\frac{A_n}{ET/E} - 1 \right) - \sum W \cdot \beta}{n}. \quad (6)$$

Для определения коэффициента состояния активной поверхности используется следующая зависимость:

$$A_n = \frac{k_6 \cdot \sum d_\phi \cdot (1 + 10^{\gamma - \beta \cdot \overline{W_{act}}})}{E}, \quad (7)$$

где A_n , γ и β – эмпирические коэффициенты, определяющие состояние активной поверхности и биологические особенности культуры в течение вегетационного периода; k_6 – биоклиматический коэффициент, мм/мБ; $\sum d_\phi$ – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха, мБ; $\overline{W_{act}}$ – относительные запасы продуктивной влаги в почве, %.

Используя экспериментальные данные по водопотреблению люцерны, выяснили, как будет определяться зависимость суммарного водопотребления к испаряемости (ET/E) от относительных запасов продуктивной влаги в почве в течение вегетационного периода люцерны [10]:

$$ET/E = A_n / (1 + 10^{\gamma - \beta \cdot \overline{W_{act}}}), \quad (8)$$

где ET/E – отношение общего расхода воды к испарению, мм; A_n , γ и β – эмпирические коэффициенты, определяющие состояние активной поверхности и биологические особенности культуры в течение вегетационного периода. Данная эмпирическая зависимость (8) уточняет положение о прямой пропорциональности между потреблением воды и запасами влаги в почве при поддержании влажности в расчетном слое почвы.

Верхним пределом оптимальной влажности для растений являются максимальная влажность и запас влаги, который соответствует наименьшей влагоемкости почвы (полной полевой влагоемкости) W_{FC} , при увлажнении почвы выше которой, избыток влаги приводит к вымыванию питательных веществ растений, эрозии почвы, пополнению запасов подземных вод и снижению плодородия земли [11, 12]. Поэтому максимальная норма полива, мм, не должна превышать значения влажности с наименьшей влагоемкостью:

$$m_{nt} = 100 \cdot h_w \cdot \rho \cdot (\omega_{FC} - b \cdot \omega_{cr}), \quad (9)$$

где m_{nt} – расчетная норма полива, мм; h_w – расчетная глубина пропитки почвы, м; ρ – плотность почвы, т/м³; ω_{FC} – влажность почвы, соответствующая наименьшей влагоемкости, % по массе; ω_{cr} – влажность, соответствующая допустимому уровню высыхания; b принимается в зависимости от гранулометрического состава почвы.

Из уравнения (9) следует, что величина нормы полива зависит от слоя влажности (h_w) и порога влажности перед поливом (ω_{cr}).

Поддержание запасов влаги активного слоя почвы в оптимальном диапазоне должно происходить за счет соблюдения условия:

$$W_{FC} \geq W_{act} > W_{cr}. \quad (10)$$

При таком поддержании запасов влаги в соответствии с выражением (10) будут обеспечены минимизация потерь воды и оптимальное влагообеспечение растения-культуры.

Несоответствие между расчетной оценкой и фактической влагообеспеченностью растений приводит к потере всех преимуществ компьютерного управления, к развитию экологически неблагоприятных процессов на орошаемых землях, снижению эффективности орошения в целом и нерациональному использованию поливной воды.

Результаты и их обсуждение. Управление орошением с использованием математических моделей требует предварительного теоретического обоснования и экспериментального определения норм водопотребления сельскохозяйственных культур, параметров модели, организации информационного обеспечения, позволяющего получать точные количественные характеристики влагообеспеченности сельскохозяйственных культур и регулировать водный режим почвы в соответствии с меняющимися стадиями органогенеза потребности в растениях в воде.

Вышеизложенное указывает на то, что для рационального использования оросительной воды с учетом экологических ограничений необходимо провести работу по совершенствованию

информационного обеспечения компьютерных технологий управления орошением, уточнению методов расчета определения общего испарения, водопотребления на основе исследований агрометеорологического и водно-теплового баланса в различных почвенно-климатических и гидрогеологических условиях.

На основе представленных зависимостей и моделей была разработана программа адаптивного регулирования полива люцерны. Алгоритм программы заключается в ежедневном определении всех показателей адаптивного нормирования полива люцерны на весь вегетационный период: запасы влаги в почве, испарение, общее

водопотребление культуры, норма полива, количество поливов, норма полива и дни полива.

В программе присутствуют 3 типа данных, которые вводятся вручную, вычисляются автоматически по заданному алгоритму, и графическая часть программы (дата вегетационного периода и запасы влаги в почве) (рис. 3, 4).

В результате адаптивного нормирования полива люцерны норма полива и дни полива устанавливаются в соответствии с графической частью программы (рис. 5), которая представляет собой график динамики запасов влаги в почве в течение всего вегетационного периода культуры.

Рис. 3. Ввод данных

Fig. 3. Data entry

Рис. 4. Окно ввода дополнительных данных

Fig. 4. Additional data entry window



Рис. 5. Графическая часть программы

Fig. 5. Graphic part of the program

Выводы

Реализованное качество управления зависит не только от уровня обеспеченности потребителей коммуникациями, вычислительной техникой, но и от того, насколько точно модели позволяют оценить динамику водного баланса сельскохозяйственных культур, точность и надежность информационного обеспечения. Для определения общей экономической эффективности использования программы адаптивного нормирования орошением проведено соотношение полученных результатов и затрат на возделывание культуры люцерны, который показал, что возделывая культуру люцерны в условиях Саратовского Заволжья, применяя предложенную методику и программу, можно повысить урожайность в среднем на 15%, снизить затраты поливной воды на 11% и затраты на формирование 1 т зеленой массы на 19%. Рациональное использование водных ресурсов обеспечит высокую экономическую эффективность и экологическую устойчивость. Компьютерные программы

являются надежным инструментом для решения задач планирования и управления режимом орошения, но только при оперировании достоверной информацией, отражающей состояние агроценоза и высокую точность расчета оптимального режима для конкретной культуры и конкретных условий.

Предложенная методика позволяет определять общее водопотребление культуры с учетом формирования водного режима расчетного слоя почвы, погодных условий внешней среды, состояния активной поверхности почвы и биологических характеристик культуры в различные фазы вегетационного периода.

Представленная методика и программа позволяют оптимально управлять орошением и получать от него максимальный эффект, направленный прежде всего на решение экологических проблем сухостепного Заволжья. Программа предназначена для специалистов отдельных фермерских хозяйств и разработки планов водопользования.

Список использованных источников

1. **Кравчук А.В.** Оперативное определение поливной нормы для каштановых и темно-каштановых почв Заволжья // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 2. С. 42-43.
2. **Пронько Н.А., Корсак В.В., Фалькович А.С.** Орошение в Поволжье: не повторять ошибок // Мелиорация и водное хозяйство. 2014. № 4. С. 16-19.
3. **Фалькович А.С., Пронько Н.А.** Прогноз водно-солевого режима почвогрунтов в системе проектирования и мониторинга объектов мелиорации // Аграрный научный журнал. 2010. № 10. С. 62-69.
4. **Затинацкий С.В., Панкова Т.А.** Ресурсосберегающая математическая модель нормирования орошения // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 10-13.
5. **Корсак В.В., Прокопец Р.В., Е.В., Юдина М.Р.** Определение суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур в аридных зонах // Научная жизнь. 2016. № 1. С. 41-51.
6. **Korsak V.V.** Influence of irrigation methods on agrophysical properties and productivity of dark chestnut soils of dry steppe on the left bank of the Volga river / N. Pronko, O. Karpova, V. Shadskikh, V. Kizhaeva // Advances in Dynamical Systems and Applications. 2021. Vol. 16. Number 1. Pp. 121-132.
7. **Abdrzakov F.K., Mikheeva O.V., Pankova T.A. et al.** Assignment of Irrigation Norms for Available Water Reserves Taking Into Account Soil Heterogeneity as a Water Saving Approach to Crop Irrigation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tashkent, Uzbekistan, 23-25 апреля 2020 г. Tashkent: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. Vol. 883. P. 012078.
8. **Abdrzakov F.K., Pankova T.A., Zatinatsky S.V. et al.** Increasing Efficiency of Water Resources Use in Forage Crops Irrigation // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. 2017. Vol. 8, № 1. Pp. 283-293.

References

1. **Kravchuk A.V.** Operational determination of the irrigation norm for chestnut and dark chestnut soils of the Trans-Volga region / A.V. Kravchuk // Melioration and water management. 2007. No. 2. P. 42-43.
2. **Pronko N.A.** Irrigation in the Volga region: do not repeat mistakes. / V.V. Korsak, A.S. Falkovich // Melioration and water management. 2014. No. 4, P. 16-19.
3. **Falkovich A.S.** Forecast of the water-salt regime of soils in the system of design and monitoring of land reclamation facilities / A.S. Falkovich, N.A. Pronko // Agrarian scientific journal. 2010. No. 10. P. 62-69.
4. **Zatinatsky S.V.** Resource-saving mathematical model of irrigation rationing / S.V. Zatinatsky, T.A. Pankova // Scientific Review. 2013. No. 11. P. 10-13.
5. **Korsak V.V.** Determination of the total water consumption of agricultural crops in arid zones / R.V. Prokopets, A.N. Nikishanov, E.V. Arzhanukhina, M.R. Yudina // Scientific life. 2016. No. 1. P. 41-51.
6. **Korsak V.V.** Influence of irrigation methods on agrophysical properties and productivity of dark chestnut soils of dry steppe on the left bank of the Volga river / N. Pronko, O. Karpova, V. Shadskikh, V. Kizhaeva // Advances in Dynamical Systems and Applications. – ISSN0973-5321. Volume 16. Number 1. 2021. P. 121-132.
7. **Abdrzakov F.K.** Assignment of Irrigation Norms for Available Water Reserves Taking Into Account Soil Heterogeneity as a Water Saving Approach to Crop Irrigation / O.V. Mikheeva, T.A. Pankova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tashkent, Uzbekistan, 23-25 апреля 2020 года. Vol. 883. Tashkent, Uzbekistan: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 012078.
8. **Abdrzakov F.K.** Increasing Efficiency of Water Resources Use in Forage Crops Irrigation / T.A. Pankova, S.V. Zatinatsky [et al.] // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. 2017. Vol. 8. No 1. P. 283-293.

9. Сафронова Т.И., Степанов В.И. Математическое моделирование в задачах агрофизики: учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2012. 182 с.

10. Затицкий С.В. Модели валидации в техническом нормировании (на примере ресурсосберегающих моделей водопотребления) / Панкова Т.А., Шмагина Э.Ю., Кочетков А.В. // Наукоедение. 2014. № 5.

11. Кравчук А.В., Корсак В.В., Кудайбергенова И.Р. Параметры увлажнения почвы в проведении экологических режимов орошения культур // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2018. № 11. С. 126-130.

12. Zeyliger A. Results of the analysis of water stress regimes for irrigated crops based on remote sensing data / A. Zeyliger, O. Ermolaeva, D. Antonov, F. Serebrennikov, A. Kravchuk, S. Zatinatsky // Advances in Science, Technology and Innovation. 2022. Pp. 319-322.

Критерии авторства

Панкова Т.А., Кравчук А.В., Орлова С.С., Михеева О.В., Миркина Е.Н., выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 03.02.2023

Одобрена после рецензирования 17.03.2023

Принята к публикации 21.03.2023

9. Safronova T.I. Mathematical modeling in problems of agrophysics / T.I. Safronova, V.I. Stepanov. Ed. KubGau, 2012. 110 p.

10. Zatinatsky S.V. Validation models in technical regulation (on the example of resource-saving models of water consumption) / T.A. Pankova E.Yu. Shmagina, A.V. Kochetkov // Naukovedenie. 2014.No. 5 [Electronic resource] identification number of the article in the journal – 27TVN514.

11. Kravchuk A.V. Soil moisture parameters in carrying out ecological regimes of crop irrigation / V.V. Korsak, I.R. Kudaibergenova // Bulletin of the Scientific and Methodological Council for Nature Management and Water Use. 2018. No. 11. P. 126-130.

12. Zeyliger A. Results of the analysis of water stress regimes for irrigated crops based on remote sensing data / O. Ermolaeva, D. Antonov, F. Serebrennikov, and others // Advances in Science, Technology and Innovation. 2022. P. 319-322.

Criteria of authorship

Pankova T.A., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mikheeva O.V., Mirkina E.N. carried out theoretical and practical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interests.

Contributions of the authors

All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

The article was submitted to the editorial office 03.02.2023

Approved after reviewing 17.03.2023

Accepted for publication 21.03.2023