

4.1.5. МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА
(СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.675

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_101

EDN: RQRAIG

Методика расчета водного режима мелиорированных земель**Юрий Анатольевич Мажайский¹, Артём Андреевич Павлов²**^{1, 2}Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Россия²kupoz@mail.ru

Аннотация. В целях повышения эффективности использования мелиорированных земель и рационального использования водных ресурсов, для достижения планируемой урожайности сельскохозяйственных культур предлагается при проектировании оросительных и осушительно-увлажнительных мелиорированных систем и расчете режима орошения культур на легких минеральных почвах с разным уровнем грунтовых вод учитывать факторы движения инфильтрационных вод и уровень подпитывания корнеобитаемого слоя грунтовыми водами. Исследования выполнены на легких минеральных почвах Мещерской низменности, относящейся к территории южной части Нечерноземной зоны. В качестве опытных культур были выбраны люпин, картофель и овес как наиболее перспективные с точки зрения окультуривания дерново-подзолистых супесчаных почв. Расчет водопотребления культур, режима влажности почв и оросительных норм приводится для разных уровней планируемой урожайности с использованием биологических коэффициентов. Представлен алгоритм расчета влажности почвы в корнеобитаемом слое, а также определения уровней грунтовых вод, элементов орошения и обеспеченных величин. С использованием разработанных методик определения элементов водного баланса и расчета водного режима супесчаных почв получены обеспеченные значения водопотребления полевых культур и вертикального влагообмена, оросительных норм и минимальных поливных интервалов. Проектный режим орошения дифференцирован по уровням урожайности и рекомендован отдельно для осушаемых почв и земель с глубоким залеганием грунтовых вод. Для проектной урожайности рекомендуемые биологически оптимальные оросительные нормы ниже применяемых в настоящее время при проектировании: на осушаемых почвах на 30–35% и на землях с глубоким залеганием грунтовых вод на 2–15%. Предложенный алгоритм расчета достаточно полно учитывает метеорологические и почвенно-гидрогеологические условия, подходит для разных сельскохозяйственных культур, так как учитывает их биологические особенности, позволяет снизить капитальные вложения в мелиорацию и рационально использовать воду при орошении.

Ключевые слова: влагообмен, орошение, инфильтрация, подпитывание, грунтовые воды, поливная норма, мелиоративные системы, супесчаные почвы

Для цитирования: Мажайский Ю.А., Павлов А.А. Методика расчета водного режима мелиорированных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 3(78). С. 101–111. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_101-111.

4.1.5. LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT
AND AGRICULTURAL PHYSICS (AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

Water regime of reclaimed lands calculation procedure**Yuri A. Mazhaysky¹, Artem A. Pavlov²**^{1, 2}Federal Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow, Russia²kupoz@mail.ru

Abstract. In order to improve the efficiency of reclaimed lands and rational use of water resources, as well as to achieve the planned crop yields it is proposed to take into account the factors of infiltration water movement and the level of recharge of root habitable layer with ground waters when designing the irrigation and double-acting reclaimed irrigation systems and calculating the irrigation regime for crops on light mineral soils with different groundwater levels. The research was performed on light mineral soils of Meshchera Lowland, which is located in the southern part of the Nonchernozem belt. Experimental crops included lupine, potato and oat as the most prospective in terms of improvement of sod-podzolic sandy-loam soils. The authors provide the calculation of crop water consumption, soil moisture regime and irrigation norms for different levels of planned yield using biological coefficients. The authors also present the algorithm for calculating the soil moisture in the root habitable layer, as well as determining the groundwater levels, irrigation elements and ensured values. Using the developed methods for determining the elements of water balance and calculating the water regime of sandy-loam soils, the authors have obtained the ensured values of water consumption of field crops and vertical moisture exchange,

irrigation norms and minimum irrigation intervals. The design irrigation regime is differentiated by yield levels and is recommended separately for drained soils and lands with deep groundwater. For the planned yield the recommended biologically optimal irrigation norms are lower than those currently used in the design (by 30-35% on drained soils and by 2-15% on lands with deep groundwater). The proposed calculation algorithm includes a sufficiently complete account for meteorological and soil hydrogeological conditions and is suitable for various agricultural crops, since it takes into account their biological characteristics and allows reducing capital investments in land reclamation and using water for irrigation rationally.

Key words: moisture exchange, irrigation, infiltration, recharge, groundwater, irrigation rate, reclamation systems, sandy-loam soils

For citation: Mazhaysky Yu.A., Pavlov A.A. Water regime of reclaimed lands calculation procedure. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(3):101-111. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_101-111.

Сельское хозяйство в условиях экономической нестабильности ставит перед наукой задачи по поиску принципиально новых решений, способствующих оптимизации физического, химического, биологического состояния агроландшафтов ввиду обострения экологических проблем, оказывающих влияние на функционирование сельскохозяйственного производства [2, 4, 12]. В свете проблем деградации мелиорированных земель, постепенно осваиваемых с середины XX в., особую актуальность приобретают инновационные направления мелиорации при выращивании полевых культур [6, 14].

Мелиорированные земли в последние 20–30 лет оказались малоиспользуемыми или заброшенными, подверженными вторичному заболачиванию, и введение в оборот таких территорий с экономической точки зрения нецелесообразно. При этом следует учитывать, что существуют частично мелиорированные территории с близким уровнем залегания грунтовых вод, которые после окультуривания могут использоваться в сельском хозяйстве. Режим орошения на данных территориях является важным элементом технологий выращивания различных сельскохозяйственных культур, которые основаны на принципах рационального использования плодородия почв, естественных процессов фотосинтеза с учетом тепловых и водных видов природных ресурсов. Особенно важно это учитывать на слабоокультуренных супесчаных почвах с неустойчивым естественным водным режимом [11]. Регулирование влажности осуществляется системами орошения и осушения. Режим орошения таких почв изучен недостаточно ввиду большого количества факторов, влияющих на уровень обеспечения влагой корнеобитаемого слоя почвы. В частности, при расчете режима орошения на осушаемых землях необходимо учитывать приток инфильтрационных вод и уровень подпитывания корнеобитаемого слоя грунтовыми водами.

При проектировании оросительных и осушительно-увлажнительных мелиоративных систем в качестве основных исходных материалов используют данные по оросительным нормам, количеству поливов, величинам поливных норм и продолжительности межполивного интервала (режим орошения), по видам орошаемых сельскохозяйственных культур [3, 8, 16].

Объем разовой поливной нормы определяется водно-физическими свойствами почвы и в частности ее водоудерживающей способностью (наименьшей влагоемкостью), глубиной расчетного слоя увлажнения и величиной предполивной влажности [1, 5, 7, 15]. Глубину расчетного слоя увлажнения почвы необходимо дифференцировать по фазам развития сельскохозяйственных культур. В зависимости от динамики развития корневой системы культур она изменяется от 20 (картофель) и 30 см (овес, люпин) в начальные фазы развития до 30 (картофель), 40 (овес) и 50 см (люпин) во второй половине вегетации.

Влагосодержание супесчаных почв заметно изменяется под влиянием различных метеорологических факторов (выпадающих атмосферных осадков, температуры воздуха и др.), а также поливов. Следовательно, применяемые режимы орошения должны максимально учитывать весь спектр внешних факторов, оказывающих влияние на обеспечение влагой корневой системы растений, в противном случае использование мелиорирован-

ных земель будет неэффективным, а водные ресурсы будут расходоваться нерационально. В этой связи необходимо детальное изучение закономерностей формирования водного режима и составляющих водного баланса, таких как вертикальный влагообмен в зоне аэрации и суммарное испарение при орошении. Успешное выполнение поставленных задач при планировании и проведении мелиоративных мероприятий возможно при условии применения научно обоснованных норм и нормативов, полученных в ходе проведения большого количества экспериментов.

Исследования выполнены на легких минеральных почвах Мещерской низменности, относящейся к территории южной части Нечерноземной зоны. Ввиду того, что рациональный проектный режим орошения можно рассчитать лишь в результате анализа оросительных норм за многолетний период, расчеты выполнены за период 40 лет. В качестве опытных культур были выбраны люпин, картофель и овес как наиболее перспективные с точки зрения окультуривания дерново-подзолистых супесчаных почв.

Сроки вегетации установлены по средним многолетним данным в зоне проведения экспериментов и материалам собственных исследований: люпин 01.05 – 30.07, картофель 01.05 – 20.08, овес 01.05 – 10.08. Сроки полива не совпадают с началом и окончанием вегетации. Поливы начали от всходов культур и заканчивали раньше уборки на одну декаду для люпина и две декады для картофеля. Расчет водного режима почв проводился от срока посадки (сева) культур. В этот период (начало мая), как установлено в опытах, почва оптимально увлажнена.

Рекомендованная посевная норма осушения пашни для данной территории составляет 60–70 см [13]. Она обеспечивается к началу работ действием осушительной сети. Для отмеченного уровня залегания грунтовых вод влажность в расчетном слое почв составляет под люпином и овсом 75 и картофелем 52 мм. Эти значения влажности почв приняты за исходные в расчетах водного режима. На неосушаемых землях грунтовые воды не влияют на влажность расчетного слоя. На начало расчетного периода она находится на уровне наименьшей влагоемкости и составляет в расчетном слое почв для овса и люпина 50 мм, а для картофеля 35 мм. В период вегетации оптимальные пределы увлажнения, расчетный слой увлажнения и поливные нормы изменялись в соответствии с нарастанием корневой системы и требованиями растений по оптимальной увлажненности почв.

Расчет водопотребления культур, режима влажности почв и оросительных норм приводился для разных уровней планируемой урожайности. С учетом недостатка многолетних декадных значений радиационного баланса и суточных температур воздуха по метеостанциям зоны, проектный режим орошения рассчитывался с использованием декадных значений среднесуточного дефицита влажности воздуха и суммы осадков по декадам.

Для расчета режима и динамики грунтовых вод использовались следующие коэффициенты:

- $\lambda = 0,00522$ и $Q = 0,65$, учитывающие дренажный сток и вертикальный влагообмен;
- $\mu = 0,0076$, определяемый водоотдачей слоя при возможных колебаниях уровня воды;
- $\sigma = 1302$, $\varphi_1 = 0,72$, $\delta = 0,13$, учитывающие водоотдачу в слое почвы;
- K_v – биологические коэффициенты водопотребления (мм/мб) при различной урожайности сельскохозяйственных культур (Y , ц/га).

Также принимали во внимание значения таких показателей, как:

- верхний (W_{max}) и нижний (W_{min}) оптимальные пределы влажности почвы, мм;
- возможная поливная норма (m_i , мм) по декадам от посадки (сева) культур (рис. 1–3) [9].

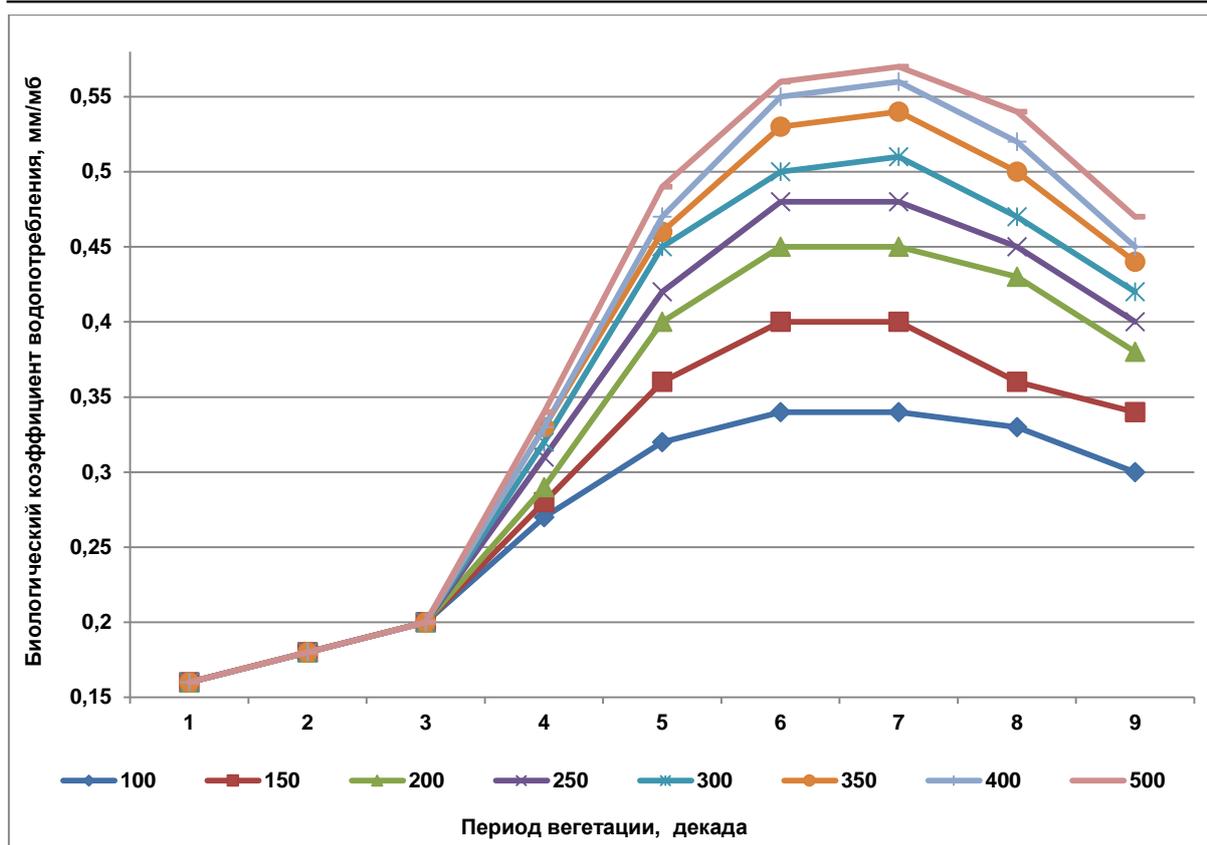


Рис. 1. Биологический коэффициент водопотребления люпина при различной урожайности, ц/га

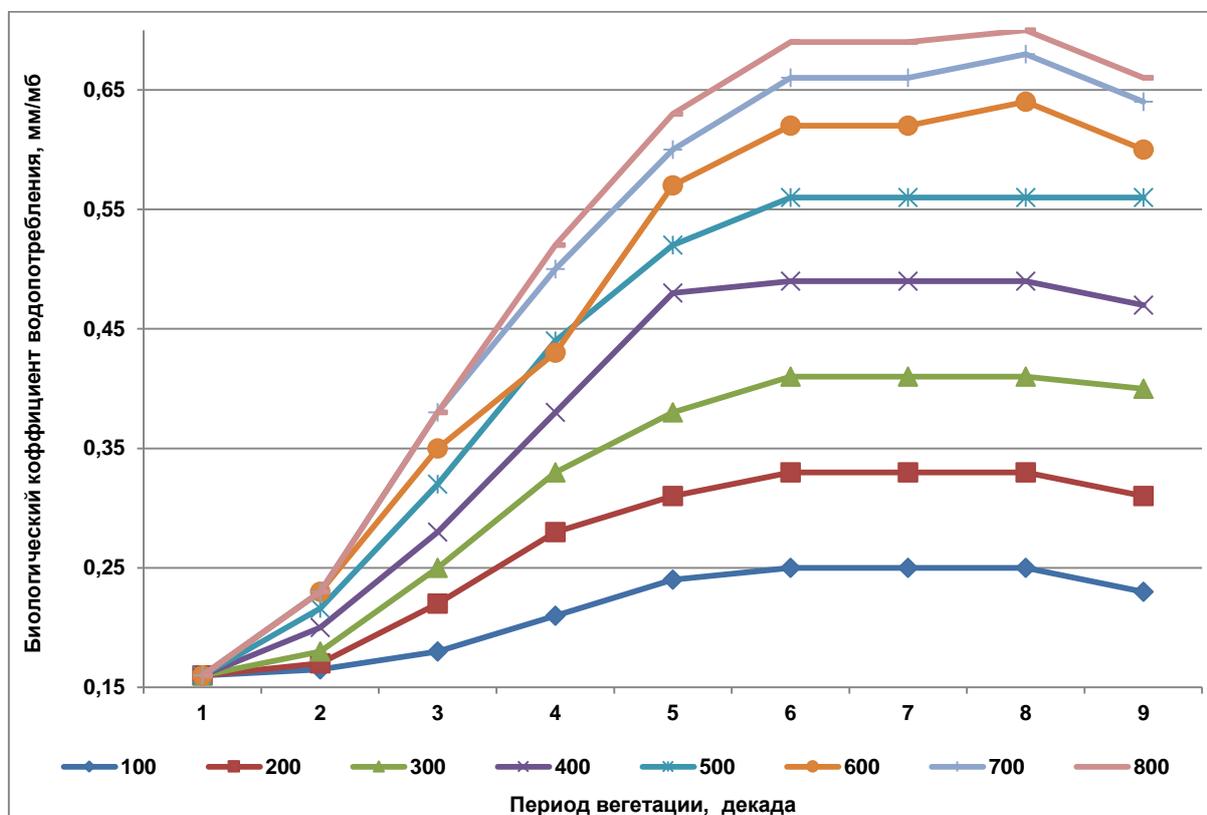


Рис. 2. Биологический коэффициент водопотребления картофеля при различной урожайности, ц/га

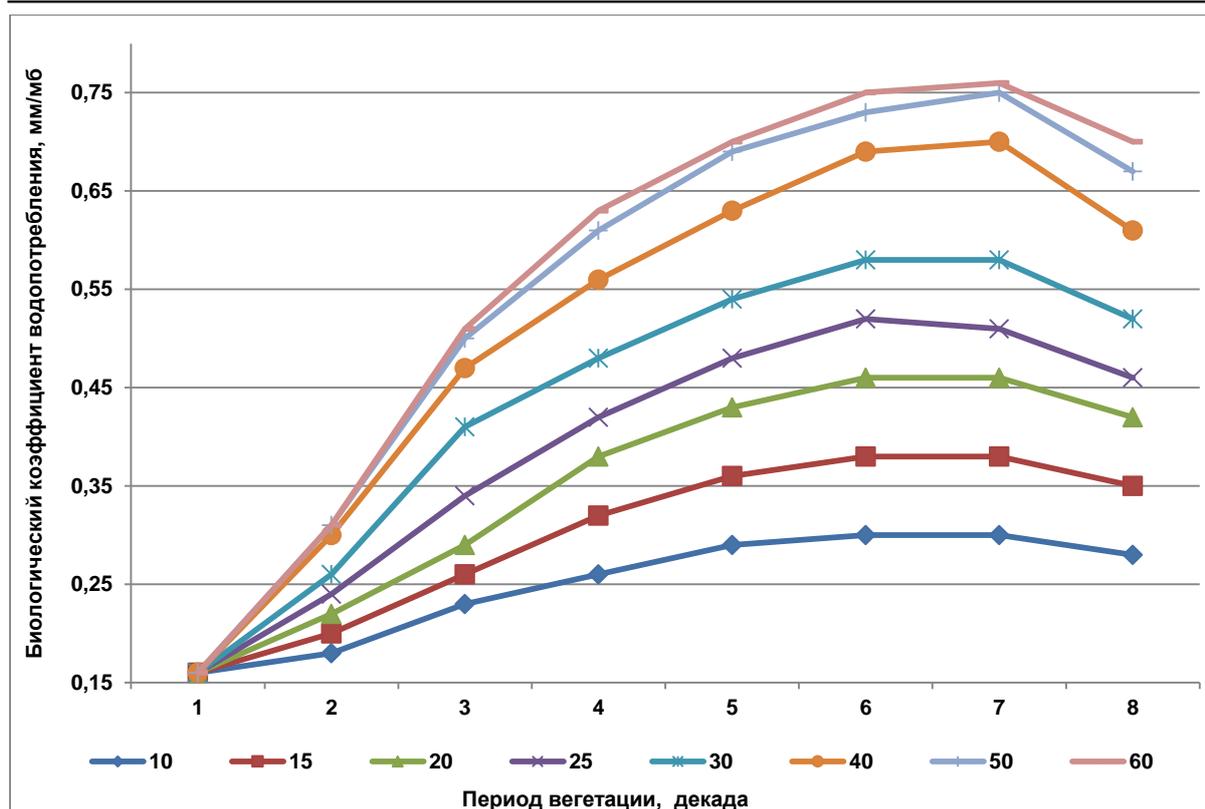


Рис. 3. Биологический коэффициент водопотребления овса при различной урожайности, ц/га

Исходная влажность в расчетном слое почвы (W_B) для овса и люпина на осушаемых землях равна 75 мм и на землях с глубоким залеганием грунтовых вод – 50 мм, для картофеля – соответственно 50 и 35 мм. Глубина заложения дрен для пашни $H_g = 1,1$ м.

1. Расчет режима влажности почвы в корнеобитаемом слое

1.1. Расчетный слой увлажнения изменяется в зависимости от фаз развития растений, поэтому расчет влагозапасов, параметров увлажнения, вертикального влагообмена проводится одновременно для слоев 20, 30 см для картофеля, 30, 40, 50 см – для люпина, 30, 40 см – для овса и для активного влагообмена 60 см для всех культур. Необходимость полива и дата его проведения определяются для расчетного слоя в конкретный период. При увеличении глубины слоя увлажнения (до 30 см и более) расчет в меньшем слое прекращается.

1.2. Расчет режима орошения проводится поочередно для каждого уровня урожайности, при этом алгоритм расчета режима орошения полностью сохраняется.

1.3. В каждую декаду конкретного года рассчитывается водопотребление (E_i):

$$E_i = b \times K_v \times d^c \times n, \quad (1)$$

где b, c – коэффициенты регрессии;

d – среднесуточный дефицит влажности, мб;

n – продолжительность расчетного периода, сутки;

K_v – биологический коэффициент водопотребления [10].

1.4. Определяется метеорологический дефицит (D_i):

$$D_i = O_i - E_i, \quad (2)$$

где O_i – осадки за расчетную декаду, мм.

1.5. Находится параметр увлажнения начального расчетного слоя почвы (S_{li}):

$$S_{li} = W_{hi} + D_i, \quad (3)$$

где W_{hi} – влагозапасы в слоях почвы 20, 30, 40, 50, 60 см на начало декады, мм.

Влагозапасы в слоях почвы определяются видом культуры. Если в декаде уровень грунтовых вод на начало расчетного периода (H_{hi}) < 0,4 м, то параметры W_{hi} , вла-

гозапас на конец расчетного периода (W_{ki}), показатель увлажнения почвы (S_{li}), вертикальный влагообмен (R_{li}) не рассчитываются, а ведется расчет только режима грунтовых вод. Вертикальный влагообмен в данном случае принимается равным метеорологическому дефициту с обратным знаком $R_{li} = -D_i$. Если в декаде уровень грунтовых вод $H_{Hi} \geq 0,4$, то $W_{Hi} = W_B$, в последующие декады $W_{Hi} = W_{K(i+1)}$.

1.6. Определяется среднесуточный дефицит водопотребления ($\Delta D_{\text{сут}}$):

$$\Delta D_{\text{сут}} = -(O_i - E_i) / n_i. \quad (4)$$

1.7. Определяется относительная влажность почвы на начало декады (K_w):

$$K_w = W_{Hi} / W_{HVi}, \quad (5)$$

где W_{Hi} , W_{HVi} – влажность в конкретном расчетном слое почвы и наименьшая влагоемкость на начало декады, мм.

В первую декаду на осушаемых землях $W_{Hi} = W_B$, на землях с глубоким залеганием грунтовых вод $W_{Hi} = W_{HB}$. Для последующей декады $W_{H(i+1)}$ принимается равной конечной в расчетах. Величина наименьшей влагоемкости соответствует верхнему пределу влажности почвы W_{max} .

1.8. Определяется вертикальный влагообмен ($\pm R$):

- для осушаемых земель по формуле (6):

$$\pm R = a \times \Delta D^b \times K_w^c \times e^{dH} \times n, \quad (6)$$

где e – основание натурального логарифма;

a, b, c, d – эмпирические коэффициенты;

- для земель с глубоким залеганием грунтовых вод по формуле (7):

$$\pm R = a \times \Delta D^b \times K_w^c \times n. \quad (7)$$

1.9. На осушаемых землях в первую декаду $H_{Hi} = H_{\text{пос}} = 0,7$ м. В последующие декады $H_{H(i+1)} = H_{ki}$, то принимается H_{ki} – уровень грунтовых вод на конец предыдущей декады (м). Если в какую-то декаду при расчете получится, что $H_{Hi} < H_{\text{пос}}$, то принимается $H_{Hi} = H_{\text{пос}}$.

1.10. Определяются влагозапасы в почве на конец декады (W_{k1i}):

$$W_{k1i} = S_{li} \pm R_{li}. \quad (8)$$

1.11. Если в слое увлажнения $W_{k1i} > W_{\text{min}}$, то расчет продолжается. Влагозапасы на начало последующей декады принимаются равными влагозапасам на конец расчетной декады $H_{H(i+1)} = W_{k1i}$.

1.12. Если $W_{k1i} \leq W_{\text{min}}$, то назначается полив нормой $m_1 = m_i$.

1.13. Дата первого полива с округлением в большую сторону (t_1) определяется по формуле (9):

$$t_1 = (W_{Hi} - W_{\text{min}}) / (|D_i| / n_i), \quad (9)$$

где W_{Hi} , W_{min} – начальная и минимальная влажность в слое увлажнения, мм;

$|D_i|$ – метеорологический дефицит по модулю, мм;

n_i – количество суток в декаде.

1.14. Вычисляется параметр увлажнения после первого полива (S_{2i}):

$$S_{2i} = S_{li} + m_1. \quad (10)$$

1.15. Определяется суточный дефицит водопотребления после первого полива ($\Delta D_{\text{сут}}$):

$$\Delta D_{\text{сут}} = (\Delta D_{\text{сут}} - (m_1 / n_i)). \quad (11)$$

1.16. Определяется вертикальный влагообмен R_{2i} с учетом первого полива по формулам (6) или (7). В них $\Delta D = \Delta D_{\text{сут}}$, а K_w после каждого очередного полива при расчете влагообмена принимается равной 1.

1.17. Находится средний за декаду влагообмен ($R_{\text{ср}1i}$):

$$R_{\text{ср}1i} = [R_{1i}t_1 + R_{2i}(n_i - t_1)] / n_i. \quad (12)$$

1.18. Вычисляются влагозапасы на конец расчетной декады после первого полива (W_{k2i}):

$$W_{k2i} = S_{2i} \pm R_{\text{ср}1i}. \quad (13)$$

1.19. Если окажется, что после первого полива $W_{k2i} > W_{\min}$, то принимается $W_{H(i+1)} = W_{k2i}$.

1.20. Если $W_{k2i} \leq W_{\min}$, то назначается второй полив нормой $m_2 = m_i$.

1.21. Дата второго полива (t_2) устанавливается из следующей зависимости:

$$t_2 = (W_{Hi} + m_1 - W_{\min}) / (|D_i| / n_i). \quad (14)$$

1.22. Определяется параметр увлажненности расчетного слоя почвы (S_{3i}):

$$S_{3i} = S_{2i} + m_2. \quad (15)$$

1.23. Определяется суточный дефицит после второго полива ($\Delta D_{2i\text{сут}}$):

$$\Delta D_{2i\text{сут}} = \Delta D_{1i} - (m_1 / n_i). \quad (16)$$

1.24. Определяется вертикальный влагообмен после второго полива R_{3i} по формуле (6) или (7), где $\Delta D = \Delta D_{2i\text{сут}}$, а $K_w = 1$.

1.25. Вычисляется средневзвешенный за декаду влагообмен ($R_{2\text{ср.взв}}$):

$$R_{2\text{ср.взв}} = [R_{1i}t_1 + R_{2i}(t_2 - t_1) + R_{3i}(n_i - t_2)] / n_i. \quad (17)$$

1.26. Вычисляются влагозапасы на конец расчетной декады и на начало следующей после двух поливов (W_{K3i}):

$$W_{K3i} = S_{3i} \pm R_{2\text{ср.взв}}. \quad (18)$$

1.27. Если после второго полива окажется, что $W_{K3i} \leq W_{\min}$, то назначается третий полив $m_3 = m_i$, затем при тех же условиях четвертый, а операции по п.п. 1.21–1.27 аналогично повторяются.

2. Расчет уровней грунтовых вод

2.1. Определение динамики уровня грунтовых вод в почве выполняется только для осушаемых земель. При оценке их понижения или повышения используется вертикальный влагообмен для слоя активного влагообмена (60 см).

2.2. Определяется напор над дренами в начале декады ($H_{O\text{нач}}$):

$$H_{O\text{нач}} = H_g - H_{Hi}, \quad (19)$$

где H_g – глубина заложения дрен, м;

H_{Hi} – уровень грунтовых вод на начало декады, м.

2.3. Если на начало декады $H_{Hi} < H_g$, то изменение глубины залегания грунтовых вод за декаду определяется по формуле (ΔH):

$$\Delta H = Q \times H_o \lambda (\pm R). \quad (20)$$

Причем вертикальный влагообмен (R_i) для слоя активного влагообмена (в мм за декаду) принимается равным последнему из значений: R_{1i}^a , $R_{1i \text{ ср.взв}}^a$, $R_{2i \text{ ср.взв}}^a$, $R_{ni \text{ ср.взв}}^a$.

2.4. Находится уровень грунтовых вод на конец декады (H_{Ki}):

$$H_{Ki} = H_{Hi} \pm \Delta H_i, \quad (21)$$

где ΔH_i – изменение уровня грунтовых вод.

2.5. Вычисляется напор над дренами в конце расчетной декады (H_{Oki}):

$$H_{Oki} = H_g - H_{Ki}. \quad (22)$$

2.6. Напор над дренами на начало последующей декады равен ($H_{OH(i+1)}$):

$$H_{OH(i+1)} = H_{Oki}. \quad (23)$$

2.7. Если на начало декады $H_{Ki} \geq H_g$, то уровень грунтовых вод определяется по формуле (H_{Ki}):

$$H_{Ki} = H_{Hi} + \mu R. \quad (24)$$

Если при определении уровня грунтовых вод окажется, что $H_{Ki} > H_g$, то нужно переходить к расчетам в следующей декаде, принимая $H_{H(i+1)} = H_{Ki}$.

Если получится $H_{Ki} < H_g$, то находится слой воды для подъема уровня грунтовых вод от H_{Hi} до H_g по формуле (25):

$$V = \delta (H_{Hi} + H_g). \quad (25)$$

При этом вычисляется слой воды, вызывающий подъем уровня залегания грунтовых вод выше дренажной сети (N) по следующей формуле:

$$N = (|0,001R| - V) / n. \quad (26)$$

2.8. Уровень грунтовых вод на конец декады рассчитывается по формуле (H_{Ki}):

$$H_{Ki} = H_g - H_{i.} \quad (27)$$

Напор между дренами на начало следующей декады ($H_{ОН(i+1)}$) определяется по формуле (28):

$$H_{ОН(i+1)} = H_{i.} \quad (28)$$

2.9. Если на конец декады $H_{Ki} < 0$, то $H_{Н(i+1)} = 0$:

$$H_{ОН(i+1)} = H_g. \quad (29)$$

3. Расчет элементов режима орошения

3.1. По датам полива определяется межполивные интервалы (T):

$$T = t_{(i+1)} - t_i. \quad (30)$$

3.2. Выбирается наименьший межполивной интервал T_{min} .

3.3. Оросительная норма (M) в конкретном году (j) году вычисляется как сумма поливных норм:

$$M_j = \sum_{i=1}^e m_i. \quad (31)$$

3.4. Определяется по декадам дефицит водного баланса (D_{Bi}):

$$D_{Bi} = -(D_i + R_i). \quad (32)$$

3.5. Подсчитывается алгебраическая сумма дефицитов водного баланса с нарастающим итогом (D_j):

$$D_j = \sum_{i=1}^e D_{Bi}, \quad (33)$$

где e – количество декад в расчетном периоде.

3.6. Определяется суммарное водопотребление (E_j):

$$E_j = \sum_{i=1}^e E_i. \quad (34)$$

В качестве примера в таблице приведен расчет режима орошения картофеля на планируемую урожайность 250 ц/га для осушаемых земель.

Расчет режима орошения картофеля на планируемую урожайность

Декады	O, мм	d, мб	E, мм	W _Н , мм	W _К , мм	R, мм	m, мм	N ₁ , сут	N ₂ , сут	T ₁ , сут	T ₂ , сут	H _Н , мм	H _К , мм	D _{Вi} , мм
1	12,6	5,4	11,5	52,0	49,6	-3,5	0	0	0	0	0	0,70	0,94	2,4
2	0,5	6,1	13,4	49,6	40,0	3,3	0	0	0	0	0	0,94	1,06	9,6
3	8,3	7,3	17,4	40,0	34,7	3,7	0	0	0	0	0	1,06	1,11	5,3
4	1,4	7,9	25,1	34,7	31,5	5,5	15	37	0	0	0	1,11	1,15	18,2
5	38,6	6,2	31,5	31,5	36,0	-2,6	0	0	0	0	0	1,15	1,13	-4,5
6	16,7	11,4	43,5	36,0	28,7	4,5	15	56	0	19	0	1,13	1,17	22,3
7	24,0	10,0	41,7	38,2	31,3	10,9	0	0	0	0	0	1,17	1,26	6,9
8	7,9	11,2	40,5	31,3	40,0	1,3	40	72	77	16	5	1,26	1,27	31,3
9	0,0	17,9	45,8	40,0	37,2	3,0	40	83	88	6	5	1,27	1,30	42,9
Сумма	110,0		270,5			26,1	110			T _{min} = 5				134,3

4. Расчет обеспеченных величин

4.1. Оросительные нормы конкретных лет (M_j), суммы дефицитов водного баланса (D_j), суммарного водопотребления (E_j) и вертикального влагообмена (R_j) располагаются в возрастающем порядке и определяются среднеголетние значения (M_{cp} (E_{cp} , D_{cp} , R_{cp})):

$$M_{cp} (E_{cp}, D_{cp}, R_{cp}) = [\sum M_j (\sum E_{cp}, \sum D_{cp}, \sum R_{cp})] / n_i, \quad (35)$$

где n_i – количество лет в расчетном периоде.

4.2. Рассчитываются модульные коэффициенты:

$$K_j^M(K_j^E K_j^D K_j^R) = M_j/M_{cp}(E_j / E_{cp}, D_j / D_{cp}, R_j / R_{cp}). \quad (36)$$

4.3. Определяются коэффициенты вариации (C_v):

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (K_j - 1)^2}{n-1}}. \quad (37)$$

4.4. Находятся коэффициенты асимметрии (C_s):

$$C_s = \sum (K_j - 1)^3 / n (C_v)^3. \quad (38)$$

4.5. Для каждого члена ранжированного ряда оросительных норм, сумм дефицитов водного баланса, суммарного водопотребления и вертикального влагообмена определяется обеспеченность (P_j):

$$P_j = (m_j - 0,3 / n_i + 0,4) \times 100 \%. \quad (39)$$

4.6. Выбранные значения минимальных межполивных интервалов T_{jmin} располагаются в убывающем порядке.

4.7. Кривые обеспеченности элементного водного баланса и режимы орошения строятся по методикам, применяемым в гидрологических расчетах [9].

Предложенный алгоритм позволяет рассчитать:

- по декадам – номер декад, атмосферные осадки и дефицит влажности воздуха, биологические коэффициенты и водопотребление культур, метеорологический дефицит, начальные и конечные влагозапасы, конечное значение вертикального влагообмена в расчетном слое почвы, сумму и даты поливов, межполивные интервалы, начальный и конечный уровень грунтовых вод;

- для всего периода вегетации – коэффициенты для расчета водопотребления, влагообмена и уровня грунтовых вод, оросительную норму, минимальный межполивной интервал, дефицит водного баланса, водопотребление и вертикальный влагообмен.

Выводы

Разработанные методики позволили рассчитать водный баланс и водный режим супесчаных почв Мещерской низменности (обеспеченные значения водопотребления полевых культур и вертикального влагообмена, оросительных норм и минимальных поливных интервалов).

Проектный режим орошения дифференцирован по уровням урожайности и рекомендован отдельно для осушаемых почв и земель с глубоким залеганием грунтовых вод.

Для проектной урожайности рекомендуемые биологически оптимальные оросительные нормы ниже применяемых в настоящее время:

- на осушаемых почвах – на 30–35%;
- на землях с глубоким залеганием грунтовых вод – на 2–15%.

При эксплуатации гидромелиоративных систем проектные режимы орошения следует корректировать по разработанной методике, учитывающей суточное водопотребление и вертикальный влагообмен.

Рекомендуемый способ моделирования водного режима почв подходит для разных сельскохозяйственных культур и достаточно полно учитывает метеорологические и почвенно-гидрогеологические условия зоны проведения исследований, биологические особенности растений, позволяет снизить капитальные вложения на мелиорацию и рационально использовать воду при орошении.

Список источников

1. Анженков А.С. Адаптационный потенциал мелиоративных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 6. С. 41–44. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-6-41-44.
2. Бабичев А.Н., Сидаренко Д.П. Водопотребление картофеля весенней посадки в зависимости от режима орошения и технологии внесения удобрений // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2022. № 1(85). С. 78–83.

3. Безбородов Ю.Г., Хожанов Н.Н., Ауганбаева Ж.С. Оценка продуктивности мелиоративных агроландшафтов Жамбылской области // Природообустройство. 2020. № 4. С. 22–27. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-4-22-27.
4. Гусев А.Ю., Медеяева З.П., Кошкина И.Г. Состояние, проблемы и перспективы землепользования в сельском хозяйстве (на примере Рязанской области) // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 3(74). С. 237–244. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_3_237.
5. Дубенок Н.Н., Майер А.В. Многолетние исследования гидротермического режима агроценозов и системы комбинированного орошения для его регулирования // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 2. С. 3–7. DOI: 10.31857/S2500262722020016.
6. Дьяконов К.Н., Пыленок П.И., Харитонов Т.И. Гидромелиоративные и постмелиоративные ландшафты Мещеры // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья: сборник докладов международной научной конференции: в 2 т. (Минск, 14–17 сентября 2016 г.). Минск: Беларуская навука, 2016. Т. 1. С. 44–47.
7. Костяков А.Н. Основы мелиораций: учебники и учебные пособия для сельскохозяйственных вузов. Москва: Сельхозгиз, 1938. 732 с.
8. Лазарева Т.С., Мажайский Ю.А., Шуравилин А.В. Водный режим почв орошаемых газонов // Мелиорация и водное хозяйство. 2016. № 6. С. 30–33.
9. Методические указания по статистической обработке экспериментальных данных в мелиорации и почвоведении. Ленинград: СевНИИГиМ, 1977. 274 с.
10. Михальцевич А.И. О совершенствовании биоклиматического расчета испарения с орошаемых полей // Мелиорация переувлажненных земель: научные труды БелНИИ мелиорации и водного хозяйства. Минск: Ураджай, 1979. Т. 27. С. 3–9.
11. Муромцев Н.А., Семенов Н.А., Мажайский Ю.А. и др. Грунтовые воды как источник водного и минерального питания растений // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование: материалы Первой Всероссийской открытой конференции (Москва, 08–10 октября 2014 г.). Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. С. 511–515.
12. Постолов В.Д., Крюкова Н.А., Денисова Е.В. и др. Землеустройство – механизм формирования и повышения эффективности ресурсного потенциала ландшафтных систем // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2010. № 3(26). С. 85–89.
13. Томин Ю.А., Панов Е.П. Режим осушения переувлажненных почв Рязанской Мещеры // Пути повышения эффективности использования мелиорированных земель в Рязанской области: сборник научных трудов Мещерского филиала ВНИИГиМ. Рязань, 1979. С. 23–29.
14. Хожанов Н.Н. Методика расчета суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3(63). С. 174–181. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-17.
15. Черемисинов А.Ю., Черемисинов А.А. Выбор метода расчета водопотребления сельскохозяйственными культурами при орошении // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4–2(47). С. 48–55.
16. Юркова Р.Е., Селицкий С.А., Докучаева Л.М. Влияние режимов орошения на водопотребление, развитие и урожайность сои // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 4. С. 204–217. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-204-217.

References

1. Anzhenkov A.S. Adaptatsionnyj potentsial meliorativnykh system [Adaptive potential of reclamation systems]. *Melioratsiya i vodnoe khozyajstvo = Reclamation and water management*. 2021;6:41-44. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-6-41-44. (In Russ.).
2. Babichev A.N., Sidarenko D.P. Vodopotreblenie kartofelya vesennej posadki v zavisimosti ot rezhima orosheniya i tekhnologii vneseniya udobrenij [Water consumption of spring planted potato depending on the irrigation regime and fertilizer application technology]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya = Ways of increasing the efficiency of irrigated agriculture*. 2022;1(85):78-83. (In Russ.).
3. Bezborodov Yu.G., Hozhanov N.N., Auganbaeva Zh.S. Otsenka produktivnosti meliorativnykh agrolandshaftov Zhambylskoj oblasti [Assessment of the productivity of the reclamation agrolandscapes of Zhambyl region]. *Prirodoobustrojstvo = Environmental Engineering*. 2020;4:22-27. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-4-22-27. (In Russ.).
4. Gusev A.Yu., Medelyaeva Z.P., Koshkina I.G. Sostoyanie, problemy i perspektivy zemlepol'zovaniya v sel'skom khozyajstve (na primere Ryazanskoj oblasti) [Current state and development trends of land management in agriculture (in a specific context of Ryazan Oblast)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(3):237-244. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_3_237. (In Russ.).
5. Dubenok N.N., Mayer A.V. Mnogoletnie issledovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrotsenozov i sistemy kombinirovannogo orosheniya dlya ego regulirovaniya [Long-term studies of the hydrothermal regime of agrocenosis and the system of combined irrigation for its regulation]. *Rossiiskaia sel'skokhoziaistvennaia nauka = Russian Agricultural Sciences*. 2022;2:3-7. DOI: 10.31857/S2500262722020016. (In Russ.).
6. Dyakonov K.N., Pylenok P.I., Kharitonova T.I. Gidromeliorativnye i postmeliorativnye landshafty Meshchery. Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnykh resursov i ustojchivoe razvitie Poles'ya: sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii: v 2 t. (Minsk, 14-17 sentyabrya 2016 g.) [Hydroameliorated and postameliorated landscapes of Meschera. Problems of rational use of natural resources and sustainable deve-

lopment of Polesie: Collection of reports of the International scientific conference: in 2 volumes (Minsk, September 14-17, 2016). Minsk: Belarusian Science Press. 2016;1:44-47. (In Russ.).

7. Kostyakov A.N. Osnovy melioratsij: uchebniki i uchebnye posobiya dlya sel'skokhozyajstvennykh vuzov [Fundamentals of land reclamation: textbooks and study guides for agricultural universities]. Moscow: Selkhozgiz; 1938. 732 p. (In Russ.).

8. Lazareva T.S., Mazhaysky Yu.A., Shuravilin A.V. Vodnyj rezhim pochv oroshaemykh gazonov [Water regime of soils of irrigated lawns]. *Melioratsiya i vodnoe khozyajstvo = Reclamation and water management*. 2016;6:30–33. (In Russ.).

9. Metodicheskie ukazaniya po statisticheskoj obrabotke eksperimental'nykh dannykh v melioratsii i pochvovedenii [Methodological guidelines for statistical processing of experimental data in land reclamation and soil science]. Leningrad: Northern Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation Press; 1977. 274 p. (In Russ.).

10. Mikhaltsevich A.I. O sovershenstvovanii bioklimaticheskogo rascheta isparenii s oroshaemykh polej. Melioratsiya pereuvlazhnennykh zemel': nauchnye trudy BelNII melioratsii i vodnogo khozyajstva [On improving the bioclimatic calculation of evaporation from irrigated fields. Reclamation of waterlogged lands: Scientific Papers of Belarusian Research Institute of Reclamation and Water Management]. Minsk: Uradzhay Press. 1979;27:3-9. (In Russ.).

11. Muromtsev N.A., Semenov N.A., Mazhaysky Yu.A. et al. Gruntovye vody kak istochnik vodnogo i mineral'nogo pitaniya rastenij. Pochvennye i zemel'nye resursy: sostoyanie, otsenka, ispol'zovanie: materialy Pervoj Vserossijskoj otkrytoj konferentsii (Moskva, 08-10 oktyabrya 2014 g.) [Groundwater as a source of water and mineral nutrition of plants. Soil and land resources: state, assessment, use: Proceedings of the First All-Russian Open Conference (Moscow, 08-10 October 2014)]. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Press; 2014:511-515. (In Russ.).

12. Postolov V.D., Kryukova N.A., Denisova E.V. et al. Zemleustrojstvo – mekhanizm formirovaniya i povysheniya effektivnosti resursnogo potentsiala landshaftnykh sistem [Land management as the mechanism for forming and increasing the efficiency of resource potential of landscape systems]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2010;3(26):85-89. (In Russ.).

13. Tomin Yu.A., Panov E.P. Rezhim osusheniya pereuvlazhnennykh pochv Ryazanskoj Meshchery. Puti povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya meliorirovannykh zemel' v Ryazanskoj oblasti [The mode of drainage of waterlogged soils of Ryazan Meshchera. Ways for improving the efficiency of reclaimed land use in Ryazan Oblast: Collection of Scientific Papers of the Meshchera Branch of All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation (VNIIGiM)]. Ryazan; 1979:23-29. (In Russ.).

14. Khozhanov N.N. Metodika rascheta summarnogo vodopotrebleniya sel'skokhozyajstvennykh kul'tur [Methodology of calculation of total water consumption of agricultural cultures]. *Izvestiya Nizhnevolszhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2021;3(63):174-181. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-17. (In Russ.).

15. Cheremisinov A.Yu., Cheremisinov A.A. Vybor metoda rascheta vodopotrebleniya sel'skokhozyajstvennyimi kul'turami pri oroshenii [Selection of method for calculating water consumption by agricultural crops under irrigation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2015;4-2(47):48-55. (In Russ.).

16. Yurkova R.E., Selitskiy S.A., Dokuchaeva L.M. Vliyanie rezhimov orosheniya na vodopotreblenie, razvitiye i urozhajnost' soi [Irrigation regimes impact on soybean water consumption, development and yield]. *Melioratsiya i gidrotekhnika = Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(4):204-217. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-204-217. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.А. Мажайский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник научного подразделения, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, director@mntc.pro.

А.А. Павлов – кандидат биологических наук, научный сотрудник научного подразделения, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, kupoz@mail.ru.

Information about the authors

Yu.A. Mazhaysky, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Scientific Department, Federal Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, director@mntc.pro.

A.A. Pavlov, Candidate of Biological Sciences, Research Scientist, Scientific Department, Federal Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, kupoz@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.05.2023; одобрена после рецензирования 25.06.2023; принята к публикации 08.07.2023.

The article was submitted 24.05.2023; approved after reviewing 25.06.2023; accepted for publication 08.07.2023.

© Мажайский Ю.А., Павлов А.А., 2023