

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.67:626.80

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-1-16

Формирование структуры влагообмена зоны аэрации орошаемого поля в условиях присутствия капиллярной каймы в толще грунта

Владимир Иванович Ольгаренко¹, Игорь Владимирович Ольгаренко²,
Сергей Яковлевич Семененко³, Владимир Игоревич Ольгаренко⁴

^{1, 2}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова –
филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск,

Российская Федерация

³Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия,
Волгоград, Российская Федерация

⁴Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹rekngma@magnet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4399-997X>

²rekngma@magnet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4865-5642>

³sergeysemenenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5992-8127>

⁴olgarenko_vi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9609-5571>

Аннотация. Цель: научно-техническое обоснование составляющих водного баланса орошаемого поля при частном случае соединения водоносного горизонта и зоны аэрации через капиллярную кайму. **Материалы и методы.** Исследования проводились в ООО «Победа» Багаевского района, хутор Елкин в 2018 и 2019 гг. При организации исследований применялся комплексный подход: использовались стационарные и опытные участки. Климатические условия объектов исследований соответствуют полупустынной степной зоне, почвы – южные черноземы. **Результаты.** В результате обработки данных полевого опыта установлено, что для условий среднесухого года в 20-х числах мая залегание уровня грунтовых вод, рассчитанное по радиационному балансу, – на глубине 1,0 м, среднесуточное водопотребление составляет 6,5 мм, подпитка грунтовыми водами – 2,9 мм, а при глубине 1,5 и 2,0 м – соответственно 2,0 и 1,25 мм. Для условий среднего года в фазе начала цветения люцерны (в первых числах июня) среднесуточное водопотребление составляет 5 мм, а подпитка грунтовыми водами 2,2; 1,38 и 0,81 мм при глубине залегания уровня грунтовых вод 1,0; 1,5 и 2,0 м соответственно. Получены значения водопотребления из уравнения теплового баланса деятельной поверхности, динамика элементов влагообмена в зоне аэрации орошаемого поля люцерны, дана сравнительная оценка испаряемости, полученной методами: радиационного баланса (точность 0,89), Н. Н. Иванова (точность 0,68) и модифицированной модели С. И. Харченко (точность 0,88), с соответствующей математической обработкой (коэффициент вариации, дисперсия, отклонение) по сумме накопленных активных температур по сравнению с фактическими данными. **Выводы:** в качестве эталонного метода следует использовать метод определения величин испаряемости сельскохозяйственных культур по радиационному балансу; реализация модифицированной модели по С. И. Харченко позволяет повысить точность определения искомой величины на 30 % по сравнению с моделью определения по Н. Н. Иванову.

Ключевые слова: зона аэрации, орошаемое поле, водный баланс, радиационный баланс, испаряемость, точность, юг России

Для цитирования: Формирование структуры влагообмена зоны аэрации ороша-

емого поля в условиях присутствия капиллярной каймы в толще грунта / В. Ив. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко, С. Я. Семененко, В. Иг. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 1–16. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-1-16>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Structure formation of moisture exchange in the aeration zone of an irrigated field in presence of a capillary fringe in soil thickness

Vladimir Iv. Olgarenko¹, Igor V. Olgarenko², Sergey Ya. Semenenko³,
Vladimir Ig. Olgarenko⁴

^{1,2}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

³All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd, Russian Federation

⁴Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹reknigma@magnet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4399-997X>

²reknigma@magnet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4865-5642>

³sergeysemenenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5992-8127>

⁴olgarenko_vi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9609-5571>

Abstract. Purpose: scientific and technical substantiation of water balance components of an irrigated field in the particular case of the connection of an aquifer and aeration zone through a capillary fringe. **Materials and methods.** The studies were carried out in Pobeda LLC, Bagaevsky district, Elkin farm in 2018 and 2019. When organizing studies, an integrated approach was used: stationary and experimental plots were used. The climatic conditions of the research objects correspond to the semi-arid steppe zone, the soils are southern chernozems. **Results.** As a result of processing the field experience data, it was determined that for the conditions of an average dry year in the last third of May, the water table occurrence, calculated according to the radiation balance, is at a depth of 1.0 m, the average daily water consumption is 6.5 mm, groundwater feeding – 2.9 mm, and at a depth of 1.5 and 2.0 m – 2.0 and 1.25 mm, respectively. For the conditions of an average year in the phase of the beginning of alfalfa flowering (in the first days of June), the average daily water consumption is 5 mm, and groundwater recharge is 2.2; 1.38 and 0.81 mm at a depth of groundwater level of 1.0; 1.5 and 2.0 m respectively. The values of water consumption are obtained from the heat balance equation of the active surface, the dynamics of moisture exchange elements in the aeration zone of an irrigated alfalfa field, a comparative assessment of the evaporation obtained by the following methods is given: radiation balance (accuracy 0.89), N. N. Ivanov (accuracy 0.68) and the modified model of S. I. Kharchenko (accuracy 0.88), with the corresponding mathematical processing (coefficient of variation, dispersion, deviation) by the sum of accumulated effective temperatures compared with the actual data. **Conclusions:** as a reference method, the method of determining the evapotranspiration of agricultural crops according to the radiation balance should be used; the implementation of the required model according to S. I. Kharchenko makes it possible to increase the accuracy of determining the desired value by 30 % compared to the determination model according to N. N. Ivanov.

Keywords: aeration zone, irrigated field, water balance, radiation balance, evaporation, accuracy, south of Russia

For citation: Olgarenko V. Iv., Olgarenko I. V., Semenenko S. Ya., Olgarenko V. Ig. Structure formation of moisture exchange in the aeration zone of an irrigated field in presence of a capillary fringe in soil thickness. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):1–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-1-16>.

Введение. Анализ результатов соответствующих научно-технических исследований, посвященных установлению величины водопотребления сельскохозяйственных культур, как российских [1–4], в т. ч. авторских¹ [5], так и зарубежных [6–8], показал значительное влияние интенсивности влагообмена в зоне аэрации на величину водопотребления, зависящей как от большого количества природных факторов: водно-физических и химических свойств почвы, фактических метеорологических и гидрогеологических условий районов орошения, глубины залегания уровня грунтовых вод; так и от реализации прогрессивных технологических процессов возделывания, и в т. ч. полива сельскохозяйственных культур.

Общеизвестно, что составляющими водного баланса орошаемого поля являются: объем воды, используемый из почвы в процессе вегетации (разница влагозапасов), оросительная норма, эффективные осадки, подпитка грунтовыми водами, а также расходные характеристики поверхностного стока и инфильтрации. Следует отметить, что величины инфильтрации и подпитки грунтовыми водами зоны аэрации – явления, зависящие прежде всего от строения почвы. В случае если водоносный горизонт и зона аэрации не связаны капиллярной каймой, при соблюдении высокого уровня агротехники и технологии орошения подпитка и инфильтрация отсутствуют. Второй случай – в той или иной степени капиллярная кайма присутствует в толще почвы, обеспечивая инфильтрацию и подпитку грунтовыми водами. Однако степень формирования данных характеристик зависит прежде всего от фактически складывающихся водно-физических характеристик почвы рассматриваемого орошаемого участка, в чем и состоит научный интерес решения данного вопроса [9, 10].

Поэтому для решения вышеуказанных проблем был научно обоснован и предложен методологический подход и соответствующие методики

¹Ольгаренко В. Иг. Управление орошением картофеля летнего срока посадки на пойменных землях Нижнего Дона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. Саратов, 2016. 20 с.

разработки моделей влагообмена в зоне аэрации на основе как эколого-ландшафтного подхода с учетом фактических гидрометеорологических и воднобалансовых факторов, так и динамики залегания уровня грунтовых вод, фаз развития растений во временном разрезе, а также установления закономерностей инфильтрационных потерь воды за пределы корнеобитаемого слоя почвы для условий оперативного управления поливами сельскохозяйственных культур и водораспределением в системе оросительных каналов; они обеспечивают значительное повышение точности определения соответствующих параметров уравнения водного баланса орошаемого поля, рациональное использование водных и энергетических ресурсов и экологически безопасное состояние мелиорированных агроландшафтов, что говорит о высокой актуальности темы исследований, особенно при условии многолетнего функционирования мелиоративных систем и наличии дефицита естественного увлажнения.

Материалы и методы. Исследования проводились в ООО «Победа» Багаевского района, хутор Елкин в 2018 и 2019 гг. При организации исследований применялся комплексный подход: использовались стационарные и опытные участки. Почвенно-климатические условия объектов исследований, как свидетельствуют результаты агрохимических анализов почвы и гидрометеорологических наблюдений, соответствуют почвенно-климатическим условиям полузасушливой степной зоны, почвы характеризуются как черноземы южные, что обосновывает их репрезентативность для почвенно-климатических и гидрометеорологических условий соответствующих степных зон юга России.

В исследовании рассматривается вариант формирования почвенных процессов, когда водоносный горизонт и находящаяся над ним капиллярная кайма частично присутствуют в толще грунта, а ее верхняя граница проникает в почвенную толщу.

Изучение элементов водного баланса зоны аэрации проводилось

на стационарном участке площадью 4,0 га лизиметрическим методом на примере возделывания люцерны для лет наблюдений с различной обеспеченностью дефицита естественного увлажнения с использованием лизиметров ГР-80 с фиксированной глубиной залегания уровня грунтовых вод по вариантам соответственно на 1,0; 1,5; 2,0 м; на площадке размещались также три контрольных лизиметра с глубиной залегания уровня грунтовых вод 1,0; 1,5; 2,5 м.

Организация и проведение исследований осуществлялись с использованием современных стандартных методик, действующих в агротехнической и гидромелиоративной науках.

Так, измерялись расход и интенсивность пополнения грунтовых вод через процессы инфильтрации атмосферных осадков и поливной воды, образующиеся под воздействием капиллярных сил, влажности почвы и градиентов температуры. Данный метод дает надежные результаты при отсутствии водоупорных прослоек в грунтах и позволяет в полной мере оценить режим влагообмена почвы.

Для определения заданных величин использовались: пиранометр, актинометр, балансомер, психрометры, термометры на специально организованных площадках, а также приборы для измерения температуры и влажности почвы. Обработка результатов исследований проводилась методом теплового баланса.

Результаты и обсуждение. Теоретической основой разрабатываемого методологического подхода является использование уравнения теплового баланса деятельной поверхности, которое имеет вид:

$$R = P + B + V,$$

$$V = ET_r \cdot L,$$

где R – измеренный радиационный баланс деятельной поверхности, Дж/м²;

P – теплопоток в почве, Дж/м²;

B – турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы, Дж/м²;

V – затраты тепла на водопотребление, Дж/м², представляющие собой произведение водопотребления сельскохозяйственной культуры (ET_T), определяемого по тепловому балансу, и скрытой теплоты парообразования (L).

Расход энергии по окислению биомассы и фотосинтезу не учитывается ввиду незначительных значений этих величин.

Величина теплотока в расчетном слое почвы (P , Дж/м²) за определенный временной период (τ) устанавливалась по зависимости:

$$P = \frac{C}{\tau} \cdot \left(\delta_1 - \frac{\alpha}{H_1 - H_2} \cdot \delta_2 \right),$$

где C – объемная теплоемкость, ккал/см²;

τ – продолжительность расчетного периода, мин;

δ_1 – величина, характеризующая изменение температуры в верхнем 20-сантиметровом слое почвы;

α – средний коэффициент температуропроводности верхнего 20-сантиметрового слоя почвы;

$H_1 - H_2$ – фиксированные глубины в рассматриваемом слое почвы, м;

δ_2 – величина, характеризующая изменение во времени разности температур почвы.

Используя данные градиентных наблюдений для расчета теплового баланса, определяют водопотребление (ET_T):

$$ET_T = \frac{R - P}{60 \cdot (1 + 0,64 \cdot \Delta t / \Delta e)},$$

где $\Delta t / \Delta e$ – соотношение соответственно градиентов температуры и влажности воздуха на высотах 0,65 и 2 м.

Комплекс эмпирических наблюдений, по которым были получены соответствующие градиенты, состоял из измерений влажности почвы мощностью слоя до 1 м; динамики влажности воздуха и температуры, скорости ветра на уровнях 0,5 и 2,0 м над поверхностью почвенного покрова;

учета отраженной и суммарной радиации и общего радиационного баланса; определения температуры почвы на поверхности и до 2,0 м в глубину.

Анализ результатов многолетних исследований, посвященных изучению динамики приходных и расходных статей элементов влагообмена в зоне аэрации на примере возделывания люцерны по фазам ее развития в течение вегетационных периодов с учетом изменений фактических гидрометеорологических, гидрогеологических, физиологических и технологических условий опытных участков орошения для лет с различной обеспеченностью по дефициту естественного увлажнения с соответствующей математической обработкой экспериментальных данных, позволил установить оптимальные значения изучаемых параметров.

При увеличении водопотребления сельскохозяйственных культур в соответствующие периоды их вегетации влагозапасы почвы, находящиеся в зоне аэрации, могут снизиться настолько, что не будут успевать пополняться за счет капиллярной подпитки вод, лежащих в более низких горизонтах. Например, при возделывании люцерны такое возможно в фазах ее наиболее активной вегетации – начала цветения и цветения. Таким образом, установлено, что на интенсивность подпитки грунтовыми водами зоны аэрации культурного растения первостепенно влияет гидрометеорологическая обстановка, глубина залегания уровня грунтовых вод и фазы развития растений (таблицы 1 и 2, рисунки 1 и 2). Для условий среднесуточного года (таблица 1, рисунок 1) в 20-х числах мая залегание уровня грунтовых вод, рассчитанное по радиационному балансу, – на глубине 1,0 м, среднесуточное водопотребление составляет 6,5 мм, подпитка грунтовыми водами – 2,9 мм, а при глубине 1,5 и 2,0 м – соответственно 2,0 и 1,25 мм. Для условий среднего года (таблица 2, рисунок 2) в фазе начала цветения люцерны (в первых числах июня) среднесуточное водопотребление составляет 5 мм, а подпитка грунтовыми водами 2,2; 1,38 и 0,81 мм при глубине залегания уровня грунтовых вод 1,0; 1,5 и 2,0 м соответственно.

Таблица 1 – Динамика элементов влагообмена в зоне аэрации люцерны в среднесухой год по дефициту
естественного увлажнения ($P_{67} = 61$ мм)

В мм

Table 1 – Dynamics of moisture exchange elements in the aeration zone of alfalfa in an average dry year according to
the deficit of natural moisture ($P_{67} = 61$ mm)

In mm

Элемент влагообмена	Расчетный период вегетации								Сумма за сезон
	1-й укос		2-й укос		3-й укос			–	
	01.04 03.05	04.05 19.06	20.06 03.07	04.07 23.07	24.07 06.08	07.08 22.08	23.08 06.09	07.09 30.09	
УГВ 1,0 м									
ET	90,0	204,6	60,0	91,6	77,0	82,7	60,5	93,5	759,9
V_{gr}	60,8	120,9	18,0	49,7	38,9	44,5	34,5	47,1	414,4
ΔW	30,0	–20,0	30,0	10,0	–30,0	25,0	0,0	5,0	50,0
V_{ϕ}	0,0	0,0	10	19,0	0,0	5,0	1,0	5,0	40,0
УГВ 1,5 м									
ET	83,4	196	59,3	93,6	78,8	81,3	48,2	77,7	718,0
V_{gr}	38,8	82,3	12,3	27,7	23,8	30,1	21,1	32,1	268,0
ΔW	–5,0	–45,0	30,0	0,0	–45,0	15,0	0,0	10,0	–20,0
V_{ϕ}	0,0	0,0	5,0	5,0	0,0	20	0,0	1,0	13,0
УГВ 2,0 м									
ET	84,4	188,5	55,0	89,4	75,5	76,9	49,1	77,1	696,0
V_{gr}	23,1	49,8	8,0	18,6	15,5	18,6	12,1	20,4	166,0
ΔW	–3,0	–70,0	35,0	0,0	–50,0	10,0	10,0	0,0	–88,0
V_{ϕ}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$P + M$	58,8	68,7	82,0	70,9	10,0	68,2	27,0	57,7	443
Примечание – ET – водопотребление, мм; V_{gr} – подпитка грунтовыми водами, мм; ΔW – динамика влагозапасов, мм; V_{ϕ} – ин- фильтрация, мм; $P + M$ – водоподача, мм.									

**Таблица 2 – Динамика элементов влагообмена в зоне аэрации люцерны в средний год по дефициту
естественного увлажнения ($P_{40} = 90$ мм)**

**Table 2 – Dynamics of moisture exchange elements in the aeration zone of alfalfa in the average year according to the
deficit of natural moisture ($P_{40} = 90$ mm)**

In mm									
Элемент вла- гообмена	Расчетный период вегетации								Сумма за сезон
	1-й укос		2-й укос		3-й укос			—	
	01.05 23.05	24.05 18.06	19.06 03.07	04.07 10.07	11.07 31.07	01.08 20.08	21.08 31.08	01.09 10.10	
УГВ 1,0 м									
ET	83,0	111,3	57,7	43,1	99,4	68,5	38,3	100,5	601,8
V_{gr}	43,0	62,2	36,4	18,6	50,4	34,7	19,6	49,2	314,1
ΔW	–30,0	25,0	65,0	–25,0	–21,0	18,0	18,0	8	58,0
V_{φ}	0,0	3,0	12,0	0,0	7,0	7,0	4,0	0	33
УГВ 1,5 м									
ET	81,0	104,8	60,0	46,7	105,6	68,2	38,3	94,3	589,9
V_{gr}	26,0	38,7	22,7	12,2	31,8	22,3	13,0	30	197,0
ΔW	–45,0	10,0	55,0	–30,0	–37,0	11,0	15,0	–5	–26,0
V_{φ}	0,0	1,0	6,0	0,0	3,0	2,0	1,0	0	13,0
УГВ 2,0 м									
ET	31,3	104,7	61,3	42,5	102,5	68,4	38,4	98,1	547,2
V_{gr}	11,3	23,6	14,0	8,0	19,9	14,8	9,0	18,8	119,4
ΔW	–60,0	–5,0	50,0	–30,0	–46,6	5,0	12,0	–20	–94,6
V_{φ}	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	1,0
$P + M$	10,0	78,1	98,3	4,5	40,0	58,4	41,0	59,3	389,6
Примечание – ET – водопотребление, мм; V_{gr} – подпитка грунтовыми водами, мм; ΔW – динамика влагозапасов, мм; V_{φ} – ин- фильтрация, мм; $P + M$ – водоподача, мм.									

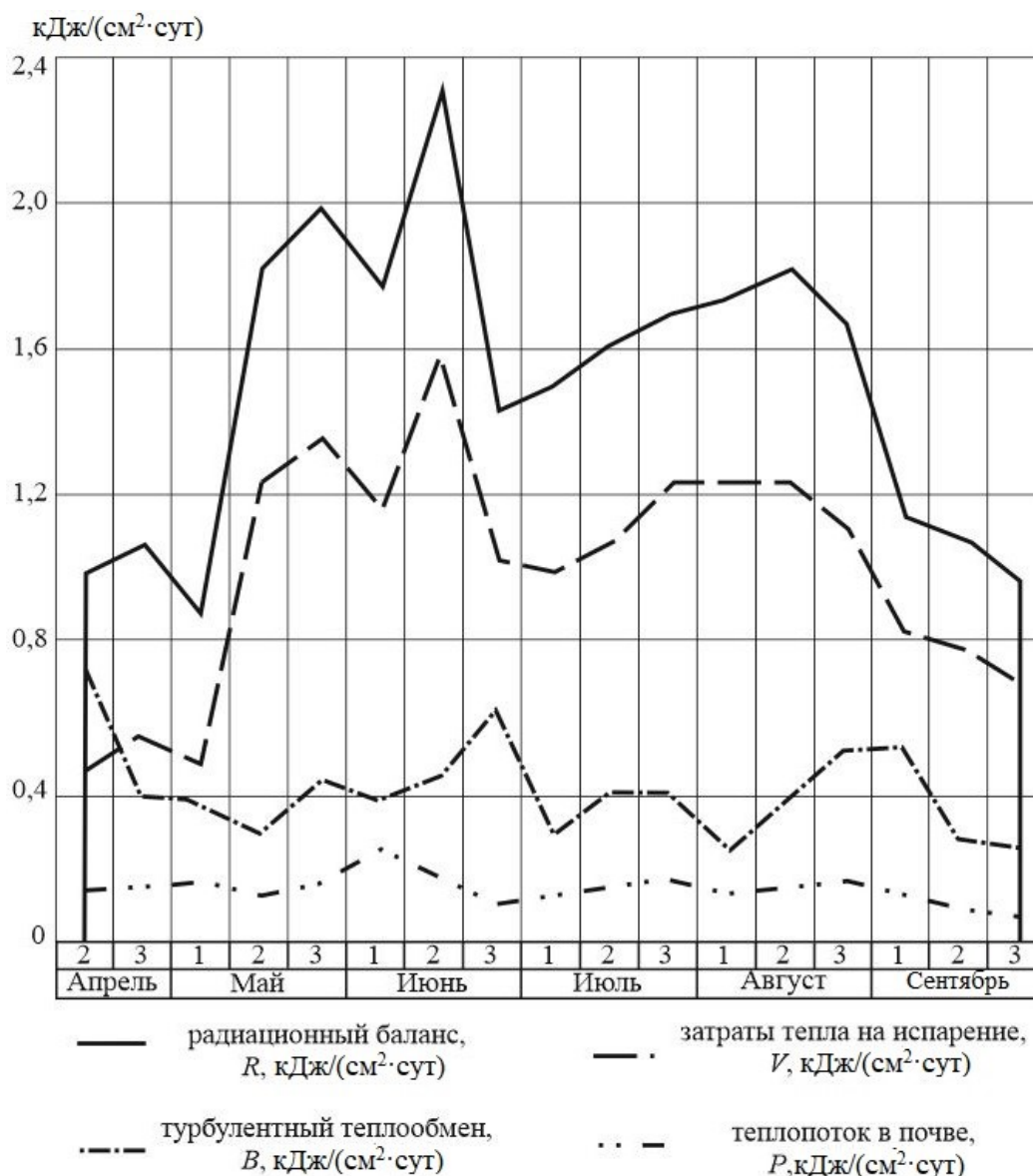


Рисунок 1 – Динамика элементов влагообмена в зоне аэрации люцерны в среднесухой год по дефициту естественного увлажнения
Figure 1 – Dynamics of moisture exchange elements in the aeration zone of alfalfa in an average dry year according to the deficit of natural moisture

Анализом установлено, что доля участия уровня грунтовых вод в формировании величины водопотребления сельскохозяйственных культур снижается при увеличении глубины его залегания, с другой стороны, роль орошения, осадков и влагозапасов возрастает. Наличие развитой корневой системы обеспечивает увеличение участия уровня залегания грунтовых вод до 3 м в формировании величины водопотребления, что говорит о необходимости учета фаз вегетационного развития сельскохозяйственных культур.

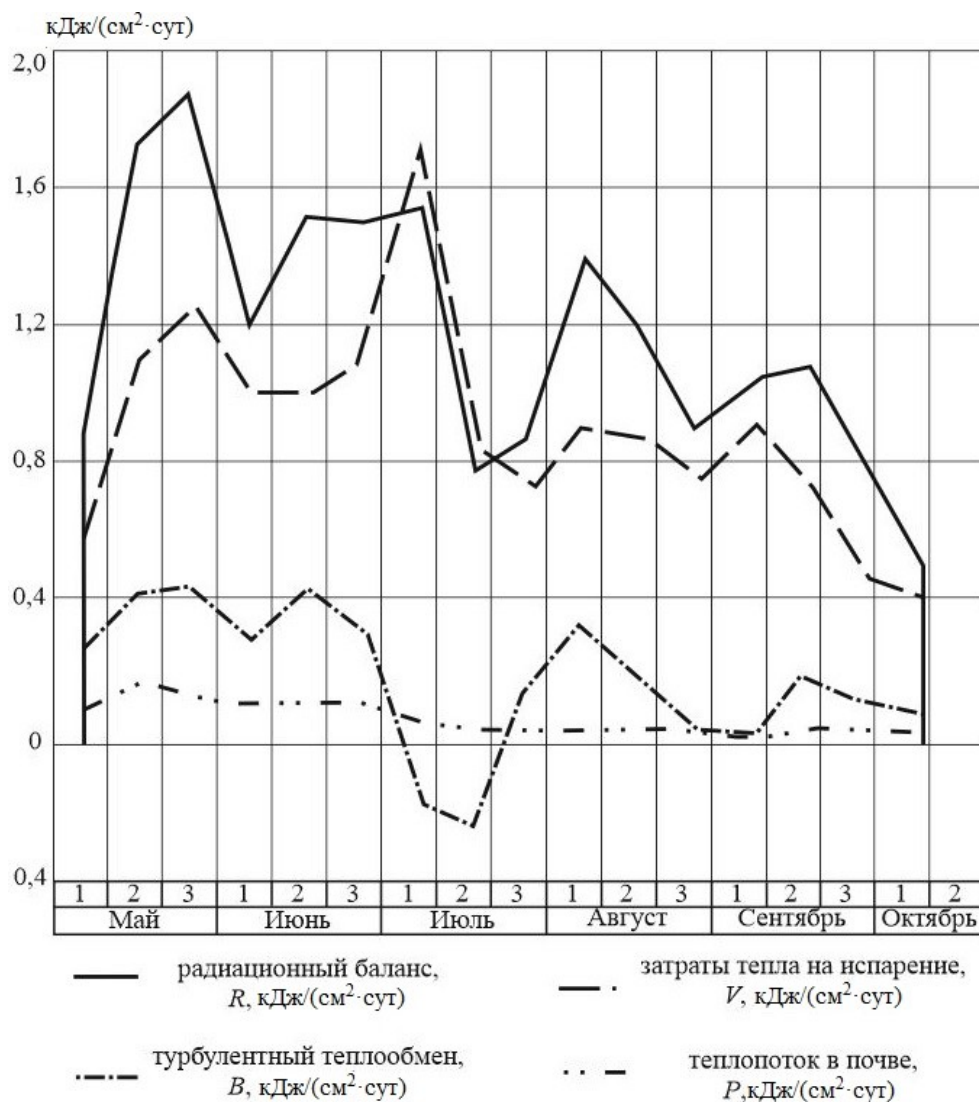


Рисунок 2 – Динамика элементов влагообмена в зоне аэрации люцерны в средний год по дефициту естественного увлажнения
Figure 2 – Dynamics of moisture exchange elements in the aeration zone of alfalfa in the average year according to the deficit of natural moisture

Величина приходной статьи в зону аэрации на основе динамики притока грунтовых вод определяется по модифицированной формуле С. И. Харченко за счет уточнения параметра m , полученного как на основе проведенных авторских экспериментальных исследований, так и путем статистической обработки соответствующих многолетних фактических экспериментальных данных [5], который обоснован учетом фактической динамики гидрометеорологических условий участков орошения и физиологических характеристик растений в течение вегетационного периода (таблица 3, рисунок 3):

$$V_{gr} = \frac{ET}{e \cdot m \cdot H},$$

где ET – водопотребление соответствующей сельскохозяйственной культуры, мм;

e – основание натурального логарифма;

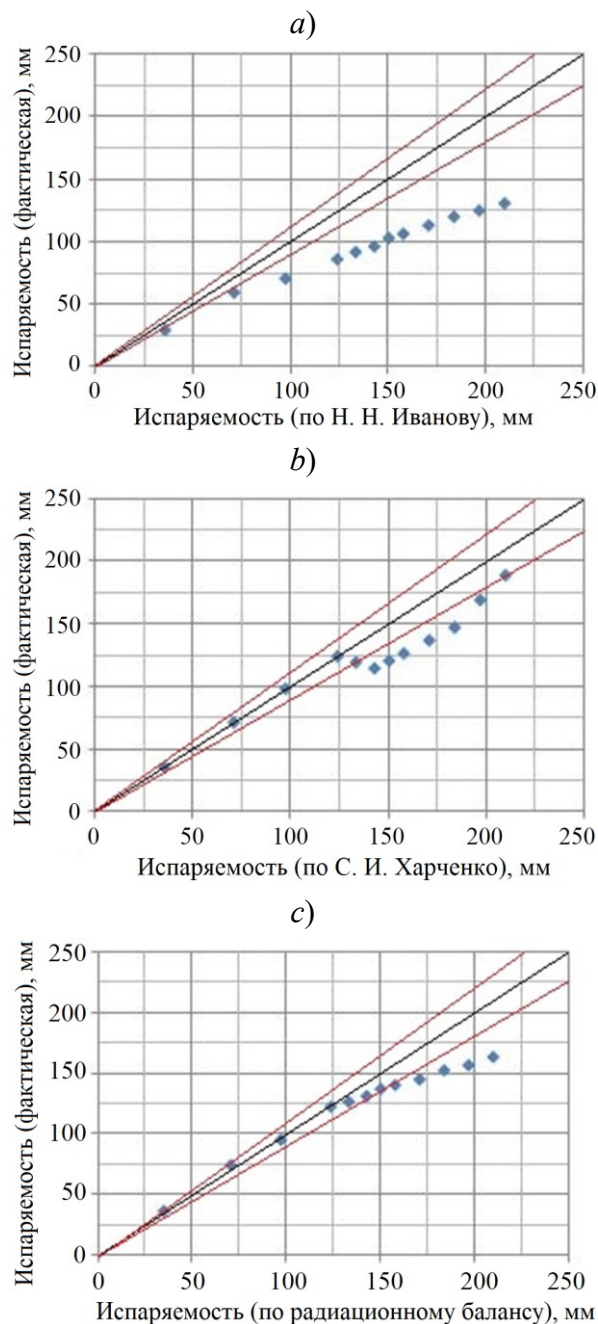
m – параметр, зависящий от фаз развития сельскохозяйственных культур, водно-физических свойств почвы и глубины залегания уровня грунтовых вод;

H – уровень грунтовых вод от поверхности почвы, м.

Таблица 3 – Сравнение расчетных значений испаряемости с фактическими и их статистическая характеристика по рассматриваемым моделям

Table 3 – Comparison of calculated evaporation values with actual ones and their statistical characteristics for the considered models

Характеристика	Сумма активных температур, °С					
	0–200	200–400	400–500	500–600	600–700	700–900
По радиационному балансу						
Отношение фактической испаряемости к расчетной	1,05	0,99	0,92	0,89	0,83	0,78
Дисперсия (σ^2)	0,0022	0,0016	0,001	0,0020	0,0025	0,0036
Отклонение (σ)	0,047	0,046	0,030	0,045	0,05	0,060
Коэффициент вариации (V , %)	4,5	4,3	5,3	5,6	7,2	7,7
По модели Н. Н. Иванова						
Отношение фактической испаряемости к расчетной	0,83	0,69	0,67	0,67	0,65	0,62
Дисперсия (σ^2)	0,0022	0,0048	0,0044	0,0044	0,0037	0,0016
Отклонение (σ)	0,047	0,069	0,066	0,055	0,0055	0,041
Коэффициент вариации (V , %)	5,6	7,8	8,1	8,5	8,3	7,6
По модифицированной модели С. И. Харченко						
Отношение фактической испаряемости к расчетной	1,00	1,00	0,8	0,8	0,8	0,9
Дисперсия (σ^2)	0,0043	0,0043	0,0057	0,0072	0,0075	0,012
Отклонение (σ)	0,064	0,076	0,074	0,085	0,036	0,108
Коэффициент вариации (V , %)	6,4	7,6	9,2	10,6	10,8	12,0



Примечание – Черные и красные линии указывают на диапазоны равенства и отклонений $\pm 10\%$ соответственно.

Note – Black and red lines indicate ranges of equality and deviations of $\pm 10\%$, respectively.

Рисунок 3 – Сравнение фактических и рассчитанных различными методами величин испаряемости (a – по модели Н. Н. Иванова; b – по модифицированной модели С. И. Харченко; c – по радиационному балансу)

Figure 3 – Comparison of actual and calculated by various methods evaporation values (a – according to the model of N. N. Ivanov; b – according to the modified model of S. I. Kharchenko; c – according to the radiation balance)

Выводы. Научно обоснован и разработан методологический подход к расчету величины испаряемости сельскохозяйственных культур, определяемой методами водного баланса, лизиметрического и теплового баланса в системе «почва – растение – атмосфера», в зависимости от широкого комплекса как фактических природных факторов, так и организационно-хозяйственных. Вышеуказанный подход обеспечивает повышение точности определения соответствующих параметров уравнения водного баланса зоны аэрации орошаемого поля, рациональное использование водных и энергетических ресурсов и экологически безопасное состояние мелиорированных агроландшафтов.

В качестве эталонного метода следует использовать метод определения величин испаряемости сельскохозяйственных культур по радиационному балансу; реализация модифицированной модели по С. И. Харченко позволяет повысить точность определения искомой величины на 30 % по сравнению с моделью определения по Н. Н. Иванову.

Список источников

1. Бородычев В. В., Лытов М. Н. Техничко-технологические основы регулирования гидротермического режима агрофитоценоза в условиях орошения // Научная жизнь. 2019. Т. 14, № 10(98). С. 1484–1495. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495.
2. Лихацевич А. П. Использование обобщенной математической модели для анализа результатов многофакторных агрономических опытов // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 1. С. 19–23.
3. Бубер А. Л., Бубер А. А., Бубер В. Б. Водоресурсное обеспечение мелиоративных систем // Основные результаты научных трудов института за 2017 год: сб. науч. тр. М.: ВНИИГиМ, 2018. С. 89–94.
4. Солодунов А. А., Бандурин М. А. Вопросы безопасной эксплуатации внутрихозяйственной сети рисовых оросительных систем // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. тез. по материалам всерос. (нац.) конф. 2019. С. 492–493.
5. Ольгаренко В. И., Ольгаренко Г. В., Ольгаренко И. В. Оптимизация процессов водопользования на основе методологии ландшафтно-экологического подхода. Новочеркасск: Лик, 2019. 623 с.
6. Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand / F. Zhang, C. He, F. Yaqiong, X. Hao, Sh. Kang // Agricultural Water Management. 2022. Vol. 260. 107245. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107245>.
7. Projection of 21st century irrigation water requirements for sensitive agricultural crop commodities across the Czech Republic / V. Potopová, M. Trnka, A. Vizina, D. Semerádová, J. Balek, M. R. A. Chawdhery, M. Musiolková, P. Pavlík, M. Možný, P. Štěpánek,

B. Clothier // *Agricultural Water Management*. 2022. Vol. 262. 107337. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107337>.

8. Exploring the potential of temperature-based methods for regionalization of daily reference evapotranspiration in two Spanish regions / A. Senatore, C. Parrello, J. Almorox, G. Mendicino // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2020. Vol. 146(3). 05020001. DOI: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001447.

9. Роде А. А. Водный режим почв и его регулирование. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 119 с.

10. Оценка точности определения эвапотранспирации с учетом вероятностного характера гидрометеорологической и воднобалансовой информации / В. И. Ольгаренко, Г. В. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко, В. Иг. Ольгаренко // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2022. № 1. С. 42–46. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2022/1/42-46>.

References

1. Borodychev V.V., Lytov M.N., 2019. *Tekhniko-tehnologicheskie osnovy regulirovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrofitotsenoza v usloviyakh orosheniya* [Technical and technological foundations for regulating the hydrothermal regime of agrophytocenosis under irrigation]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], vol. 14, no. 10(98), pp. 1484-1495, DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495. (In Russian).

2. Likhatsevich A.P., 2018. *Ispol'zovanie obobshchennoy matematicheskoy modeli dlya analiza rezul'tatov mnogofaktornykh agronomicheskikh opytov* [Generalized mathematical model for analyzing obtained results of agronomic experiments]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 1, pp. 19-23. (In Russian).

3. Buber A.L., Buber A.A., Buber V.B., 2018. *Vodoresursnoe obespechenie meliorativnykh sistem* [Water resource supply of reclamation systems]. *Osnovnye rezul'taty nauchnykh trudov instituta za 2017 god: sb. nauch. trudov* [Main Results of Scientific Works of the Institute for 2017: Collection of Scientific Papers]. Moscow, VNIIGiM, pp. 89-94. (In Russian).

4. Solodunov A.A., Bandurin M.A., 2019. *Voprosy bezopasnoy ekspluatatsii vnutrikhozyaystvennoy seti risovykh orositel'nykh sistem* [Issues of safe operation of the on-farm network of rice irrigation systems]. *Nauchnoe obespechenye agropromyshlennogo kompleksa: sbornik tezisov po materialam Vserossiyskoy (nats.) konferentsii* [Scientific Support of the Agro-Industrial Complex: coll. of abstracts of proceedings of the All-Russian National Conference], pp. 492-493. (In Russian).

5. Olgarenko V.I., Olgarenko G.V., Olgarenko I.V., 2019. *Optimizatsiya protsessov vodopol'zovaniya na osnove metodologii landshaftno-ekologicheskogo podkhoda* [Optimization of Water Use Processes Based on the Landscape-Ecological Approach Methodology]. Novocherkassk, Lik Publ., 623 p. (In Russian).

6. Zhang F., He C., Yaqiong F., Hao X., Kang Sh., 2022. Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand. *Agricultural Water Management*, vol. 260, 107245, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107245>.

7. Potopová V., Trnka M., Vizina A., Semerádová D., Balek J., Chawdhery M.R.A., Musiolková M., Pavlík P., Možný M., Štěpánek P., Clothier B., 2022. Projection of 21st century irrigation water requirements for sensitive agricultural crop commodities across the Czech Republic. *Agricultural Water Management*, vol. 262, 107337, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107337>.

8. Senatore A., Parrello C., Almorox J., Mendicino G., 2020. Exploring the potential of temperature-based methods for regionalization of daily reference evapotranspiration in two Spanish regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 146(3), 05020001, DOI: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001447.

9. Rode A.A., 1963. *Vodnyy rezhim pochv i ego regulirovanie* [Soil Water Regime and Its Regulation]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 119 p. (In Russian).

10. Olgarenko V.I., Olgarenko G.V., Olgarenko I.V., Olgarenko V.Ig., 2022. *Otsenka tochnosti opredeleniya evapotranspiratsii s uchetom veroyatnostnogo kharaktera gidrometeorologicheskoy i vodnobilansovoy informatsii* [Accuracy evaluation of evapotranspiration determining taking into account the probabilistic nature of hydrometeorological and water balance information]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of the Russian Agricultural Science], no. 1, pp. 42-46, <https://doi.org/10.30850/vrsn/2022/1/42-46>. (In Russian).

Информация об авторах

В. Ив. Ольгаренко – профессор кафедры, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Заслуженный деятель науки РФ, профессор;

И. В. Ольгаренко – заместитель директора по научно-инновационной работе, доктор технических наук, доцент;

С. Я. Семененко – главный научный сотрудник, доктор сельскохозяйственных наук, профессор;

В. Иг. Ольгаренко – старший научный сотрудник, кандидат технических наук.

Information about the authors

V. Iv. Olgarenko – Professor of the Department, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor;

I. V. Olgarenko – Deputy Director for Science and Innovation, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

S. Ya. Semenenko – Chief Researcher, Doctor of Agricultural Sciences, Professor;

V. Ig. Olgarenko – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 17.05.2023; approved after reviewing 03.07.2023; accepted for publication 05.07.2023.