

# Гидрология и водное хозяйство Гидрология және су шаруашылығы Hydrology and water management

---

---

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-2-3-14.8>

УДК 631.675:631.672  
МРНТИ 68.31.21

Ж. С. Мустафаев<sup>1</sup>, А. А. Кудерин<sup>2</sup>, А. Н. Омаров<sup>3</sup>, А. Б. Тулетаев\*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Д. т. н., главный научный сотрудник  
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; [z-mustafa@rambler.ru](mailto:z-mustafa@rambler.ru))

<sup>2</sup> PhD доктор, старший научный сотрудник  
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; [kuderin@list.ru](mailto:kuderin@list.ru))

<sup>3</sup> Научный сотрудник  
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; [omaraidos@inbox.ru](mailto:omaraidos@inbox.ru))

<sup>4\*</sup> PhD докторант (КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; [hat\\_0512@mail.ru](mailto:hat_0512@mail.ru))

## НОРМИРОВАНИЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ И КУЛЬТУР С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

**Аннотация.** Представлена разработанная методика расчета экологического нормирования водопотребления сельскохозяйственных угодий и культур с учетом пространственно-временной изменчивости климатических, гидрологических, почвенных и биологических показателей природной системы. Отмечается, что антропогенная нагрузка в виде дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий и культур должна основываться на принципах энергетической сбалансированности тепла, влаги и питательных веществ с учетом природных условий, обеспечивающих целенаправленное регулирование и управление почвообразовательными процессами в гидроагроландшафтах. Разработанная модель и алгоритм оценки водопотребления сельским хозяйством построены с использованием двух моделей нормирования водопотребления – сельскохозяйственных угодий и культур, что позволяет определить наиболее важные критерии природопользования в условиях орошаемого земледелия и имеет большое значение в обеспечении продовольственной безопасности населения.

**Ключевые слова:** агроландшафт, биология, водопотребление, климат, почва, почвообразование, сельскохозяйственные угодья и культуры.

**Введение.** В мире разработаны различные типы математических моделей с использованием гидрометеорологических показателей для нормирования водопотребности сельскохозяйственных угодий и культур. Методология нормирования водопотребности сельскохозяйственных угодий и культур базируется на оперативной и достоверной информации показателей природной среды – климатических, гидрогеологических, почвенных и биологических.

На основе научного анализа по нормированию водопотребности сельскохозяйственных угодий и культур сформированы рабочие гипотезы по совершенствованию естественно-научного представления о современных экологических механизмах определения суммарного испарения и нормирования орошения, которые базируются на законе сохранения энергии, так как рассмотрение процесса влагообмена между деятельной поверхностью участка суши и воздухом немислимо без связи с процессом теплообмена.

**Материалы и методы исследования.** Нормирование объемов водопотребления и водоотведения отраслями сельского хозяйства, которые являются одними из основных потребителей среди видов экономической деятельности, входит в состав балансовой оценки водных ресурсов при разработке комплексных программ их рационального использования и охраны.

Основа расчета норм водопотребления сельскохозяйственных угодий – дефицит суммарного водопотребления растительного и почвенного покрова, являющийся функцией температуры и относительной влажности воздуха и скорректированный с учетом атмосферных осадков, изменения, которые связаны с изменчивостью дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий [1]. Количественные значения норм водопотребности сельскохозяйственных угодий научно обоснованы и подтверждены на практике, для расчета используются компьютерные программы «Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование» [2] и «Расчет параметров режимов орошения сельскохозяйственных культур» [3].

Для полноценной оценки природного потенциала тепла и влаги на сельскохозяйственных угодьях рекомендуются комплексные показатели [4]: испаряемость (потенциальная эвапотранспирация) ( $E_{oi}$ , мм); атмосферные осадки ( $AP_i$ , мм); активные запасы почвы ( $ASMR_i$ , мм) от наименьшей влагоемкости ( $LMC_i$ ) до влажности разрыва капиллярной связи; коэффициент природного увлажнения ( $C_{nmi}$ ), равный соотношению элементов водного и теплового балансов.

Месячная испаряемость ( $E_{oi}$ , мм) рассчитывается по модифицированной формуле, разработанной Н. Н. Ивановым:

$$E_{oi} = EEF_i \times LAH_i \times F(W)_i, \quad (1)$$

где  $EEF_i$  – энергетический фактор испарения, мм/мб, учитывающий нелинейность связи при изменении температуры воздуха;  $LAH_i$  – дефицит влажности воздуха, мб;  $F(W)_i$  – ветровая функция, учитывающая влияние скорости ветра на интенсивность испарения.

Энергетический фактор испарения определяется как

$$EEF = 0,0018 \times (25 + MAAT_i)^2 / SVP_i, \quad (2)$$

где  $MAAT_i$  – среднемесячная температура воздуха за расчетный интервал, °С;  $SVP_i$  – упругость насыщенного пара при этой температуре, мб.

Дефицит влажности воздуха ( $LAH_i$ , мб) равен

$$LAH_i = SVP_i \times (1 - 0,01 \times RAH_i), \quad (3)$$

где  $RAH_i$  – относительная влажность воздуха, %.

Динамическая часть процесса испаряемости  $F(W)_i$  устанавливается следующим образом:

$$F(W)_i = 0,64 \times (1 + 0,19 \times WS_i), \quad (4)$$

где  $WS_i$  – скорость ветра на высоте 2 м от поверхности земли, м/с.

Для выполнения расчетов выбираются репрезентативные в регионе метеостанции с наблюдениями метеоданных не менее чем за 35-60 лет.

Показатель тепло-влагообеспеченности – коэффициент природного увлажнения ( $C_{nmi}$ ) определяется как

$$C_{nmi} = (SAP_i + ASMR_i) / SE_{oi}, \quad (5)$$

где  $C_{nmi}$  – коэффициент природного увлажнения за период, в течение которого среднесуточная температура воздуха 5° С;  $ASMR_i$  – активные запасы влаги в метровом слое почвы на начало расчетного периода (дата перехода среднесуточной температуры воздуха через +5°С), мм;  $SAP_i$  – сумма атмосферных осадков за расчетный период, мм;  $SE_{oi}$  – испаряемость (потенциальная эвапотранспирация) за расчетный период, мм.

Эвапотранспирацию (суммарное испарение) сельскохозяйственных культур ( $EAC_{vi}$ , мм) как исходную величину водно-балансовых расчетов при определении дефицита водопотребления (оросительных норм) рассчитывают следующим образом:

$$EAC_{vi} = BCAC_i \times MCAL_i \times E_{oi}, \quad (6)$$

где  $E_{oi}$  – испаряемость, мм;  $BCAC_i$  – биологический коэффициент, характеризующий роль растений в расходовании влаги сельскохозяйственным полем;  $MCAL_i$  – микроклиматический коэффициент, учитывающий изменение микроклимата сельскохозяйственного поля под влиянием орошения.

Дефицит водопотребления ( $WCD_{ni}$ , мм) или оросительная норма ( $IN_{ni}$ , мм) (нетто) сельскохозяйственной культуры находится по зависимости

$$WCD_{ni} = IN_{ni} = EAC_{vi} - (ASMR_i + AP_i + CUGW_i) - OMOIF_i, \quad (7)$$

где  $WCD_{ni}$  – дефицит водопотребления культуры за расчетный интервал (декада, месяц), мм;  $EAC_{vi}$  – оптимальное водопотребление культуры за расчетный период, мм;  $ASMR_i$  – активные влагозапасы в деятельном слое почвы к началу расчетного периода, мм;  $AP_i$  – атмосферные осадки за расчетный период, мм;  $CUGW_i$  – капиллярное использование грунтовых вод при их близком залегании (не более 3 м), мм;  $OMOIF_i$  – отток влаги за пределы орошаемого поля, в том числе поверхностный и глубинный, мм.

Нормы (дефицит) водопотребности или оросительная норма (брутто) сельскохозяйственных культур определяются по формуле

$$WCD_{gi} = WCD_{ni} \times \eta_{si} \quad \text{или} \quad IN_{gi} = IN_{ni} \times \eta_{si}, \quad (8)$$

где  $WCD_{gi}$  и  $IN_{gi}$  – дефицит водопотребности или оросительная норма брутто сельскохозяйственных культур;  $\eta_{si}$  – суммарный коэффициент, учитывающий потери воды на поле в процессе полива ( $\eta_{si} = 1 + \sum_{i=1}^n \eta_i/100$ , где  $\eta_i$  – один из видов потерь).

Средневзвешенный дефицит водопотребности сельскохозяйственных культур ( $WANWD_{gfi}$ ) определяется на структурный поливной гектар, то есть на фиктивную единичную площадь орошения, на которой условно выращиваются все характерные для данного района сельскохозяйственные культуры в соотношениях, соответствующих принятым севообороту и структуре поля, и рассчитывается по формуле

$$WANWD_{gfi} = (INC_{gf1} \times C_1 + INC_{gf2} \times C_2 + INC_{gfi} \times C_i) / (C_1 + C_2 + C_i), \quad (9)$$

где  $WANWD_{gfi}$  – средневзвешенный дефицит водопотребности (брутто-поле), отнесенный к структурному гектару;  $INC_{gf1}$ ,  $INC_{gf2}$ ,  $INC_{gfi}$  – оросительная норма брутто-поле  $i$ -й сельскохозяйственной культуры, м<sup>3</sup>/га;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_i$  – коэффициент, учитывающий долю  $i$ -й сельскохозяйственной культуры в структуре орошаемых земель расчетной территории, административной области, %.

Казахским научно-исследовательским институтом водного хозяйства [5] предложена формула для определения почвенно-мелиоративной нормы орошения сельскохозяйственных культур:

$$SRNIAC_i = (IN_{ni} - EAC_{vi} \times CGU_i \times CS_i) / RC_i, \quad (10)$$

где  $SRNIAC_i$  – оросительная норма, обеспечивающая мелиоративное благополучие орошаемых земель, м<sup>3</sup>/га;  $IN_{ni}$  – оросительная норма (нетто) сельскохозяйственных культур при благоприятных почвенно-мелиоративных условиях, м<sup>3</sup>/га;  $EAC_{vi}$  – суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур, м<sup>3</sup>/га;  $CGU_i$  – коэффициент, учитывающий долю возможного использования грунтовых вод в водопотреблении сельскохозяйственных культур;  $CS_i$  – коэффициент, учитывающий размеры допустимого участия грунтовых вод в субиригации при изменении их минерализации;  $RC_i$  – мелиоративный коэффициент, учитывающий степень засоления и соленотдачи почв зоны аэрации.

Большая часть современных методов нормирования водопотребления сельскохозяйственных культур построена на основе решения известного уравнения водного баланса, где основной расходный элемент – суммарное испарение. Теоретической их основой является связь между водным балансом и энергетическими ресурсами орошаемого поля, которые оцениваются и определяются такими комплексными показателями, как испаряемость и эвапотранспирация, имеющие эмпирические связи с температурой и дефицитом влажности воздуха:

– при нормировании водопотребности агроэкосистем на Северном Кавказе для определения суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур ( $EAC_{oi}$ ) используется формула А. М. Алпатыева [6], основанная на упрощенной формуле Н. Н. Иванова [7]:

$$EAC_{oi} = CP_i \times SAHD_i, \quad (11)$$

где  $CP_i$  – коэффициент пропорциональности между испаряемостью и дефицитом влажности воздуха, равный 0,61;  $SAHD_i$  – сумма дефицитов влажности воздуха за расчетный период [8];

– в Республике Беларусь (ТКП 45-3.04-178-2009) водопотребление сельскохозяйственными культурами ( $WCC_i$ , мм) определяется следующим образом [9]:

$$WCC_i = BCWC_i \times \sum_{i=1}^n CADHD_i, \quad (12)$$

где  $BCWC_i$  – биофизический коэффициент водопотребления сельскохозяйственных культур, мм/мб;  $CADHD_i$  – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха за рассматриваемый промежуток времени, мб;

– в Республике Казахстан водопотребление сельскохозяйственных культур ( $WCAC_i$ ) рассчитывается с применением формулы Н. Н. Иванова, где используется месячная испаряемость ( $E_{oi} = 0,0018 \times (25 + МААТ_i)^2 \cdot (100 - RAH_i)$ , мм/месяц) с корректировкой биоклиматического коэффициента сельскохозяйственных культур ( $BCAC_i$ ) и микроклиматического коэффициента ( $MCAL_i$ ) [5]:

$$EAC_{vi} = \sum_{i=1}^n BCAC_i \times MCAL_i \cdot E_{oi}, \quad (13)$$

где  $EAC_{vi}$  – суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур за рассматриваемый промежуток времени;  $i$  – количество месяцев за рассматриваемый промежуток времени;

– в Республике Узбекистан суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $EAC_{oi}$ ) рассчитывается как произведение эталонной эвапотранспирации сельскохозяйственной культуры ( $CE_{oi}$ ) на коэффициент культуры  $CC_i$  [10]:

$$EAC_{vi} = \sum_{i=1}^n CC_i \times CE_{oi}, \quad (14)$$

где  $CE_{oi}$  – месячная эвапотранспирация культуры (мм/месяц), которая определяется по формуле Н. Н. Иванова:  $E_{oi} = 0,0018 \times (25 + МААТ_i)^2 \cdot (100 - RAH_i)$ ;  $CC_i$  – коэффициент культуры, равный 0,80 в условиях Центральной Азии;

– в Кыргызской Республике суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $EAC_{oi}$ ) находится как произведение месячной испаряемости ( $E_{oi}$ ) на биоклиматический коэффициент культуры ( $BCC_i$ ) и коэффициент атмосферного давления ( $APC_i = RAP_i/APA_i$ ), где  $RAP_i$  – эталонное атмосферное давление, равное 902 мб, на высоте 1000 м;  $APA_i$  – атмосферное давление в рассматриваемой зоне [11]:

$$EAC_{vi} = \sum_{i=1}^n BCC_i \times APC_i \times E_{oi}, \quad (15)$$

– в Украине суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $EAC_{oi}$ ) определяется по методике В. П. Остапчика, представляющей собой дальнейшее развитие методики А. М. и С. М. Алпатьевых, где вместо суммы дефицита влажности воздуха ( $SAHD_i$ ) используется испарение с водной поверхности ( $E_{oi}$ ) [12]:

$$EAC_{oi} = BCC(E_o)_i \times \sum_{i=1}^n E_{oi}, \quad (16)$$

где  $BCC(E_o)_i$  – биоклиматический коэффициент, характеризующий среднее для данного состояния развития данного вида (сорта) отношения суммарного испарения ( $E_{vi}$ ) к испарению с водной поверхности ( $E_{oi}$ ), измеренного ГПИ-3000;  $E_{oi}$  – испарение с водной поверхности, которое рассчитывается как

$$E_{oi} = \alpha \times SAHD_i^{b \times ADAT_i}, \quad (17)$$

где  $SAHD_i$  – среднесуточный дефицит влажности, мб;  $ADAT_i$  – среднесуточная температура воздуха, °C;  $\alpha$  и  $b$  – показатели испаряемости, определяемые эмпирическим путем;

– в США суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $EAC_{oi} = \sum_{i=1}^n MWCR_i$ ) определяется с учетом климатических факторов по формуле Блейни-Криделла [13]:

$$MWCR_i = 25,4 \times [BCC_i \times DDH_i \times (1,8 \times МААТ_i + 32)]/100, \quad (18)$$

где  $MWCR_i$  – месячная норма водопотребления, мм;  $DDH_i$  – продолжительность часов дневного времени, % от годовой их суммы (принимают в зависимости от широты местности и месяца);  $BCC_i$  – биоклиматический коэффициент водопотребления данной культуры за месяц;  $MAAT_i$  – среднемесячная температура воздуха, °C;

– во Франции суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $EAC_{vi} = \sum_{i=1}^n MWC_i$ ) находится по формуле [13]:

$$MWC_i = 16 \times (10 \times AMT_i / SMHI_i)^\alpha, \quad (19)$$

где  $MWC_i$  – месячное водопотребление;  $MT_i$  – средняя месячная температура, °C;  $SMHI_i$  – сумма месячных индексов тепла за год, определяемых по формуле  $SMHI_i = (MT_i/5)^{1,514}$ , где  $\alpha$  – эмпирический коэффициент, рассчитываемый по формуле  $\alpha = 0,000000675 \times SMHI_i^3 - 0,0000771 \times SMHI_i^2 + 0,01792 \times SMHI_i + 0,49239$ ;

– в Англии, частично в Австралии и США суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $EAC_{vi}$ ) определяют по формуле [14, 15]:

$$\begin{aligned} ME_i &= (VPS_i \times I_i + AD_i \times HCA_i \times VPD_i \times ASCI_i) / [HCA_i \times ((VPS_i + PC_i))]; \\ ME_i &= [RCS_i \times (I_i - SHFD_i) + AD_i \times HCA_i \times VPD_i \times ASCI_i] / ERI_i; \\ ERI_i &= \{RCS_i + PC_i \times [1 + (ASCI_i / REWM_i)]\} / HCA_i, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $ME_i$  – месячное суммарное испарение, мм/мес;  $VPS_i$  – наклон кривой насыщения давления паров, Па/К;  $I_i$  – освещенность, Вт/м<sup>2</sup>;  $AD_i$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $HCA_i$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг × К);  $VPD_i$  – дефицит давления паров, Па;  $ASCI_i$  – импульс аэродинамической поверхностной проводимости, м/с;  $HCA_i$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $PC_i$  – психрометрическая постоянная, Па/К;  $RCS_i$  – скорость изменения насыщения удельной влажности с температурой воздуха, Па/К;  $SHFD_i$  – плотность почвенного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $REWM_i$  – скорость испарения водных масс, г × с/м<sup>2</sup>;  $ERI_i$  – показатель энергетических ресурсов.

Как показывает анализ, в мировой практике нормирование водопотребности сельскохозяйственных угодий осуществляется на основе уравнения водного баланса орошаемых земель, и только при определении количественного значения основного элемента расходной части – суммарного водопотребления применяются различные модификации энергетического уравнения, построенные с использованием температуры и дефицита влажности воздуха и радиационного баланса поверхностного слоя растительного и почвенного покрова, которые определяют физическую и математическую значимость, надежность и достоверность решаемых задач.

**Результаты исследования.** В прошлом и в настоящее время при нормировании водопотребности на сельскохозяйственные нужды использовалось понятие средневзвешенных биологически оптимальных оросительных норм сельскохозяйственных культур, удовлетворяющих потребности растений на различных типах почв, а также учитывались укрупненные нормы водопотребности для орошения сельскохозяйственных культур по агроклиматическим зонам [16].

Опыт мелиорации сельскохозяйственных земель показывает, что человечество для создания оптимальных условий культурным растениям, несмотря на ограниченность водных ресурсов в зонах орошаемого земледелия, с целью получения рекордных и потенциальных урожаев постоянно повышало нормы водопотребности орошаемых земель, тем самым снижая экологическую эффективность гидроагроландшафтных систем [17]. Отсюда стали появляться понятия не только «биологическая водопотребность культур», но и «почвенно-мелиоративная водопотребность агроландшафтов», обеспечивающая регулирование мелиоративного режима почв, экологическую водопотребность сельскохозяйственных угодий. Эти водопотребности определялись через расчеты экологически благоприятных оросительных норм для почв и ландшафтов [18-20], почвенно-экологические оросительные нормы, обеспечивающие оптимальный почвообразовательный процесс на орошаемых землях [17]. При этом антропогенная нагрузка рассматриваемых процессов должна сопоставляться с биологическим потенциалом природного объекта и основываться на принципах обеспечения экологической стабильности его на всех иерархических уровнях, выраженных в экологических пределах. Для решения этой проблемы требуется создание технологий орошения, максимально исключаящих потери оросительной воды на фильтрацию, поддержани-

вающих систему автоморфного режима почвообразующих факторов, предусматривающих цикличность биологических процессов, базирующихся на учете геоэкологических ограничений при территориальном планировании оросительной мелиорации [17, 21].

С этих позиций более четко представлено понятие «экологическая норма водопотребности (увлажнения) почв», разработанное Ж. С. Мустафаевым [16], которое обеспечивает полный учет геоэкологических (климатических) ограничений при территориальном планировании оросительных мелиораций [22] по следующим параметрам:

- нижний порог предельно допустимого уровня нормы водопотребности ( $WRS_{mpl}^{lt}$ );
- транспирация растений ( $PT_i$ ), обеспечивающая формирование биологических масс и верхнего предельно допустимого уровня нормы водопотребности ( $WRS_{mpl}^{ut}$ );
- экологические нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий ( $ESWRAL_i$ ), обеспечивающих целенаправленное регулирование и управление почвообразовательными процессами на орошаемых землях [17].

При разработке методики экологического нормирования водопотребности сельскохозяйственных угодий использован принцип энергетической сбалансированности тепла, влаги и питательных веществ с учетом природных факторов, позволяющий обеспечить сохранение экологически благоприятного энергетического режима в почве, зонах аэрации и насыщение грунтовыми водами агроландшафтов, который определяется по формуле [23]:

$$ESWRAL_i = ASRB_i / HCA_i, \quad (21)$$

где  $ASRB_i$  – радиационный баланс деятельной поверхности, ккал/(см<sup>2</sup>/год);  $HCA_i$  – скрытая теплота парообразования, величина постоянная [0,6 ккал/см<sup>3</sup>, или 2,51 кДж/см<sup>2</sup> (1 ккал = 4,19 кДж)].

Географическая особенность радиационного баланса ( $ASRB_i$ ) деятельной поверхности приземного слоя воздуха и почвы характеризуется суммой активных температур воздуха ( $\sum SAAT_i > 10^\circ C$ ). Для расчета радиационного баланса по сумме активных температур Ю. Н. Никольским и В. В. Шабановым [24] установлена зависимость

$$ASRB_i = 4,19 \times [13,39 + 0,0079 \times \sum SAAT_i > 10^\circ C]. \quad (22)$$

Дефицит экологической нормы водопотребления ( $DEWC_{ni}$ , мм) или экологической оросительной нормы ( $IN_{ni}$ , мм) (нетто) сельскохозяйственных угодий рассчитывают по зависимости [25, 26]:

$$DEWC_{ni} = [ASRB_i / (HDL_{il} \times HCA_i)] - (HDL_{il} \times HCA_i) \times (ASMR_i + AP_i + BSG_i), \quad (23)$$

где  $HDL_{il}$  – гидротермический индекс сухости орошаемых земель;  $ASMR_i$  – изменение почвенных влагозапасов, мм;  $BSG_i$  – влагообмен между почвенными и грунтовыми водами.

При этом для расчета экологически безопасной нормы орошения взят  $HDL_{il} = 1,0$ , при котором наблюдаются благоприятные условия формирования почвообразовательного процесса, тогда дефицит экологической нормы водопотребления ( $DEWC_{ni}$ , мм) сельскохозяйственной угодий определяется по выражению:

$$DEWC_{ni} = [ASRB_i / HCA_i] - HCA_i \times (ASMR_i + AP_i + BSG_i). \quad (24)$$

Дефицит водопотребления ( $DWC_{aci}$ ) или оросительная норма ( $IN_{aci}$ ) сельскохозяйственных культур (нетто) рассчитывается на основе уравнения водного баланса орошаемых земель

$$\begin{aligned} DWC_{acni} = IN_{acni} &= EAC_{vi} - (ASMR_i + AP_i + BSG_i) = \\ &= BCAC_i \times MCAL_i \times E_{oi} - (ASMR_i + AP_i + BSG_i). \end{aligned} \quad (25)$$

Дефицит водопотребления ( $DWC_{aci}$ ) или оросительная норма ( $IN_{aci}$ ) сельскохозяйственных культур (брутто) определяется как

$$DWC_{acgi} = DWC_{acni} \times \eta_{si} \text{ или } IN_{acgi} = IN_{acni} \times \eta_{si}, \quad (26)$$

где  $\eta_{si}$  – коэффициент полезного действия техники и технологии орошения.

Дополнительная норма водопотребления сельскохозяйственных угодий, необходимая в вегетационный период, обеспечивающая мелиоративное благополучие орошаемых земель, находится по следующей формуле [27] и является одной из модификаций классической формулы В. Р. Волобуева [28]:

$$WR_i = 10000 \times (SRC_i/SRAC_i) \times \lg(SCBW_i/SCAW_i), \quad (27)$$

где  $WR_i$  – промываемая норма, обеспечивающая мелиоративное благополучие орошаемых земель, м или м<sup>3</sup>/га;  $SRC_i$  – коэффициент солеотдачи;  $SRAC_i$  – коэффициент ускорения солеотдачи:  $SRAC_i = 2,02 \times \exp(-9,57 \times RWAIS_i)$ ;  $RWAIS_i$  – скорость впитывания воды в почву;  $SCBW_i$  – содержание солей в промываемом слое почвы в начале технологического процесса;  $SCAW_i$  – содержание солей в промываемом слое почвы в конце технологического процесса.

Для решения водохозяйственных проблем в условиях дефицита водных ресурсов при глобальном изменении климата, прежде всего, необходимо теоретическое обоснование нормативных показателей для долгосрочного прогнозирования и планирования деятельности в сфере сельскохозяйственного природопользования [25]:

– суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ( $E_{vi}$ ) или дефицит суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур ( $\Delta E_{vi}$ ) – количество воды, требуемое для пополнения физического испарения с поверхности почвы и транспирации с листовой поверхности культуры, является функцией климатических показателей природной системы и биологических особенностей сельскохозяйственных культур, которые необходимы для оптимизации состава и структуры адаптивно-ландшафтных систем земледелия с учетом геоэкологических ограничений при территориальном планировании оросительных мелиораций, то есть средневзвешенный дефицит водопотребления сельскохозяйственных культур в структуре гидроагроландшафтов не должен быть больше, чем дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий:

$$WANWD_{gfi} = \sum_{i=1}^n WCD_{ni} \times \alpha_i \leq DEWC_{ni}, \quad (28)$$

где  $WCD_{ni}$  – дефицит водопотребления  $i$ -й сельскохозяйственной культуры в гидроагроландшафте, м<sup>3</sup>/га;  $n$  – количество сельскохозяйственных культур, входящих в структуру гидроагроландшафта;  $\alpha_i$  – доля сельскохозяйственных культур в структуре гидроагроландшафта;  $DEWC_{ni}$  – дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий, м<sup>3</sup>/га;  $WANWD_{gfi}$  – средневзвешенный дефицит водопотребления сельскохозяйственных культур в структуре гидроагроландшафта;

– суммарное водопотребление сельскохозяйственных угодий ( $ESWRAL_i$ ) или дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) – количество воды, требуемое для пополнения физического испарения с поверхности почвенного покрова и транспирации с поверхности растительного покрова, является функцией климатических показателей природной системы и затрат энергии на почвообразование, которое необходимо для нормирования забора воды из природных источников ( $VWIFNS_i$ ), водоподачи для сельскохозяйственных угодий и мощности водохозяйственных систем.

При этом объем водоподачи для сельскохозяйственных угодий ( $VWSAL_i$ ) можно представить как функцию дефицита суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ), мощности адаптивно-ландшафтных систем земледелия ( $CALFS_i$ ) и надежности техники и технологии водоподачи ( $REWST_i$ ), то есть  $VWSAL_i = f(DEWC_{ni}, CALFS_i, REWST_i)$ . Объем забора воды из природных источников в свою очередь является технологической функцией объема водоподачи для сельскохозяйственных угодий ( $VWIFNS_i$ ) и надежности водохозяйственных систем ( $RWMS_i$ ), то есть  $VWIFNS_i = f(VWSAL_i, RWMS_i)$  [46].

Дефицит суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) и сельскохозяйственных культур ( $WCD_{ni}$ ) в основном существенно изменяется по годам в зависимости от условий тепло- и влагообеспеченности территории. Отсюда при решении водохозяйственных задач необходимо прогнозировать оросительную норму на 5, 25, 50, 75 и 95 % водообеспеченности, показывающих вероятность превышения расчетной величины в ряде одноименных переменных.

Дефициты суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) и водопотребления сельскохозяйственных культур ( $WCD_{ni}$ ) для расчетной обеспеченности к фиктивному году можно определить по выражению [29]:

$$\begin{aligned} DEWC_{ni} &= DEWC_{alti} \times (0,010 \times EE_i + 0,484); \\ WCD_{ni} &= WCD_{alti} \times (0,010 \times EE_i + 0,484), \end{aligned} \quad (29)$$

где  $DEWC_{alti}$  – среднееголетний дефицит суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий;  $WCD_{ni}$  – среднееголетний дефицит суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур;  $EE_i$  – расчетная обеспеченность, %.

В условиях глобального изменения климата наблюдается постоянный рост температуры воздуха, что приводит к повышению норм суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий, а снижение годовых атмосферных осадков способствует увеличению дефицита суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий, что необходимо учитывать при долгосрочном прогнозировании водоресурсного потенциала водосбора речных бассейнов [30, 31, 32].

На основе многолетних климатических показателей, включающих температуру и влажность воздуха, годовые атмосферные осадки, формируется база исследования в ретроспективе не менее чем за 80 лет, позволяющая с использованием энергетических моделей определить сумму температур воздуха, испаряемости и радиационного баланса дневной поверхности растительного и почвенного покрова в биологически активный период года, в рамках которой создается многолетний временной ряд для изучения картины изменения климатических и энергетических характеристик за исследуемой временной интервал.

Для определения закономерностей изменения среднегодовых температур воздуха и годовых атмосферных осадков, сумм температур воздуха, испаряемости и радиационного баланса дневной поверхности растительного и почвенного покрова во времени можно использовать метод линейного тренда, то есть метод статистической математики, который широко применяется для оценки тенденций роста и имеет вид линейной регрессии:  $Y_i = \alpha \times X_i + b$ , где  $Y$  – расчетное значение показателя наблюдений;  $X$  – порядковый номер наблюдаемой величины;  $\alpha$  и  $b$  – регрессионные коэффициенты.

Линейно-корреляционная модель климатических и энергетических показателей возникла из логического предположения о возможности получения некоторых математических выражений для оценки темпа роста и прироста, которые рассчитываются как разность или отношения двух сравнительных периодов временного статистического ряда:

– абсолютный прирост характеризует увеличение или уменьшение климатических показателей за определенный промежуток времени ( $\Delta\bar{Y}$ ), то есть показывает количественное значение любого климатического показателя ( $Y_i$ ) в конце рассматриваемого периода ( $X_i$ ) к его начальному значению ( $Y_0$ ) в начале рассматриваемого периода ( $X_0$ ), где  $X_0 = 1 = \text{const}$ , и рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \Delta\bar{Y} &= Y_i - Y_0 = [(\alpha \times X_i + b) - (\alpha \times X_0 + b)] = \\ &= (\alpha \times X_i + b - \alpha \times X_0 - b) = (\alpha \times X_i - \alpha \times X_0) = \alpha \times (X_i - X_0) = \alpha \times (X_i - 1); \end{aligned} \quad (30)$$

– темп прироста показывает относительную величину абсолютного прироста климатических показателей ( $\bar{Y}$ ) за промежуток рассматриваемого периода и определяется по выражению

$$\bar{Y} = [\alpha \times (X_i - 1)]/X_i; \quad (31)$$

– коэффициент роста представляет собой отношение количественного значения любого климатического показателя ( $Y_i$ ) в конце рассматриваемого периода ( $X_i$ ) к его начальному значению ( $Y_0$ ) в начале рассматриваемого периода ( $X_0$ ) и находится по формуле:

$$K_p = Y_i/Y_0 = (\alpha \times X_i + b)/(\alpha \times X_0 + b) = (\alpha \times X_i + b)/(\alpha + b). \quad (32)$$

В зависимости от многолетнего режима климатических показателей – среднегодовых температур воздуха ( $AT_{aai}$ , °C) и годовых атмосферных осадков ( $AP_i$ ), которые в природе встречаются в виде роста или спада линейного тренда, характеризующих тенденцию изменения климатических показателей:

– положительный:  $AT_{aai} = a_i \times N_i + a_0$  и  $AP_i = a_i \times N_i + a_0$ ;

– отрицательный:  $AT_{aai} = -a_i \times N_i + a_0$  и  $AP_i = -a_i \times N_i + a_0$  или  $AT_{aai} = a_i \times N - a_0$  и  $AP_i = a_i \times N_i - a_0$ ,  $N$  – порядковый номер наблюдаемой величины;  $a_0$  и  $a_i$  – регрессионные коэффициенты или свободный численный показатель.

Если при оценке изменения климатических показателей наблюдается положительный тренд среднегодовых температур воздуха ( $AT_{aai}$ , °C) и связанных с ними сумм температур воздуха

( $\sum SAAT_i > 10^\circ C$ ), радиационного баланса дневной поверхности растительного и почвенного покрова ( $ASRB_i$ ), испаряемости водной поверхности ( $E_{oi}$ ) и отрицательный тренд годовых атмосферных осадков ( $AP_i$ ), которые в совокупности выполняют важные средообразующие функции, то эта ситуация может привести к различным экологическим последствиям:

– положительный темп прироста испаряемости с водной поверхности ( $\bar{Y}E_{oi}$ ) и атмосферных осадков ( $\bar{Y}AP_i$ ), последний не может компенсировать темп прироста испаряемости, который больше в 2-4 раза, способствует умеренному темпу роста дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $\bar{Y}DEWC_{ni} = \bar{Y}E_{oi} - \bar{Y}AP_i$ );

– положительный темп прироста испаряемости с водной поверхности ( $\bar{Y}E_{oi}$ ) и отрицательный темп прироста атмосферных осадков ( $\bar{Y}AP_i$ ) способствуют интенсивному темпу прироста дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $\bar{Y}DEWC_{ni} = \bar{Y}E_{oi} - (-\bar{Y}AP_i)$ ).

На основе анализа структурного образования темпа прироста климатических показателей можно с большой достоверностью определить тенденцию изменения дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) и сельскохозяйственных культур ( $WCD_{ni}$ ):

– интенсивность прироста дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) и сельскохозяйственных культур ( $WCD_{ni}$ ) за промежутки рассматриваемого периода ( $PUR_i$ ) определяется по формуле

$$\begin{aligned} GRDEWC_{ni} &= GRWCD_{ni} = \bar{Y}DEWC_{ni}/PUR_i = (\bar{Y}E_{oi} - \bar{Y}AP_i)/PUR_i, \\ GRDEWC_{ni} &= GRWCD_{ni} = \bar{Y}DEWC_{ni}/PUR_i = [\bar{Y}E_{oi} - (-\bar{Y}AP_i)]/PUR_i; \end{aligned} \quad (33)$$

– перспективный дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) и сельскохозяйственных культур ( $WCD_{ni}$ ) за прогнозируемый период ( $\Delta FR_i$ ) находится по выражению

$$\begin{aligned} PDEWC_{ni} &= BDEWC_{ni} + GRDEWC_{ni} \times \Delta FR_i; \\ PWCD_{ni} &= BWCD_{ni} + GRWCD_{ni} \times \Delta FR_i, \end{aligned} \quad (34)$$

где  $BDEWC_{ni}$  и  $BWCD_{ni}$  – базовый дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий ( $DEWC_{ni}$ ) и сельскохозяйственных культур ( $WCD_{ni}$ ).

Предложенная авторами статьи методика нормирования водопотребности сельскохозяйственных угодий и культур в пространственных и временных аспектах с учетом изменчивости климата при различном сочетании уровня агресурсного потенциала ландшафтов сельскохозяйственного использования позволяет достоверно оценить взаимосвязь единого комплекса «растение – климат – вода – почва».

**Выводы.** Прогноз перспективного водопотребления сельскохозяйственных угодий и культур представляет собой действия по сбору, обобщению и анализу исходной информации, выполнению статистических расчетов оценки их изменений в условиях меняющегося климата, разработку методических приемов и имеет природообусловленный характер, который может реагировать на тот или иной сценарий потепления климата.

Особо следует отметить, что разработанные модель и алгоритм оценки водопотребления сельским хозяйством построены с использованием двух моделей нормирования водопотребления – сельскохозяйственных угодий и культур. Это позволило определить наиболее важные критерии природопользования в условиях орошаемого земледелия и имеет большое значение в обеспечении продовольственной безопасности населения и экологического баланса на водосборах речных бассейнов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 58331.3–2019. Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования ГОСТ от 15 марта 2019 г. – № 58331.3 – 2019.
- [2] Компьютерная программа «Расчет параметров режимов орошения сельскохозяйственных культур» (ROCK.xls). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ за № 2004610996. – 22 апреля 2004.

- [3] Программа для ЭВМ «Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование». Свидетельство о государственной регистрации № 2009610137, дата регистрации 11 января 2009 г.
- [4] Методические указания по нормированию орошения с учетом корректировки биологических коэффициентов, дифференциации почвенно-климатических условий и пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических факторов: метод. указ. – М., 2022. – 80 с.
- [5] Ибатуллин С. Р., Кван Р. А., Парамонов А. И., Балгабаев Н. Н. Нормирование орошения в водохозяйственных бассейнах Казахстана. – Тараз, 2008. – 122 с.
- [6] Алпатьев А. М. Влагообороты в природе и их преобразования. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 323 с.
- [7] Иванов Н. Н. Об определении величин испаряемости // Известия ВГО. – 1954. – Т. 86, № 2. – С. 189-196.
- [8] Ильинская И. Н. Нормирование водопотребления для орошения сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 164 с.
- [9] ТКП 45-3.04-178-2009 (02250) – Оросительные системы. Нормы проектирования: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Введены в действие с 29.12.2009 г. – Минск, 2010. – 74 с.
- [10] Стулина Г. В., Солодкий Г. Ф. Использование усовершенствованной методики ФАО для оценки водопотребления сельскохозяйственных культур в процессе орошения в Центральной Азии. – Ташкент, 2020. – 127 с.
- [11] Саипов Б. Природно-мелиоративное районирование горной территории и оптимизация режимов орошения сельскохозяйственных культур в Кыргызстане: Автореферат дис. ... докт. с/х. – Бишкек, 1998. – 50 с.
- [12] Остапчик В. П. Информационно-советующая система управления орошением. – Киев: Урожай, 1989. – 248 с.
- [13] Черемисинов А. А., Черемисинов А. Ю. Обзор расчетных методов определения суммарного испарения орошаемых сельскохозяйственных полей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 1 (21). – С. 113-133.
- [14] Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc. R. Soc. – London, 1948. – Vol. 193. – P. 120-145.
- [15] Пенман Х. Л. Растение и влага. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 161 с.
- [16] Щедрин В. Н., Докучаева Л. М., Юркова Р. Е. К обоснованию экологических норм водопотребности различных типов почв для оптимизации мелиоративного состояния и почвенного плодородия // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2018. – № 1 (29). – С. 105-121.
- [17] Мустафаев Ж. С., Рябцев А. Д., Козыкеева А. Т., Кененбаев Т. С., Сабденалиев А. М. Основные принципы нормирования водопотребности агроландшафтов // Водное хозяйство Казахстана. – 2009. – № 2. – С. 3-12.
- [18] Парфенова Н. И. Энергетические основы формирования плодородия почв // Вопросы мелиорации. – 2002. – № 2. – С. 64-70.
- [19] Кирейчева Л. И. Оценка эффективности оросительных мелиораций в зональном ряду почв // Почвоведение. – 2015. – № 5. – С. 587-596.
- [20] Манукьян Д. А. Оценка экологической безопасности функционирования гидромелиоративных систем с использованием термодинамических показателей // Природообустройство. – 2008. – № 2. – С. 45-50.
- [21] Мустафаев Ж. С. Экологический профиль мелиорации сельскохозяйственных земель // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 13-22.
- [22] Орлова И. В. Учет геоэкологических ограничений при территориальном планировании оросительных мелиораций // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2014. – № 1 (13). – С. 147-157.
- [23] Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 255 с.
- [24] Никольский Ю. Н., Шабанов В. В. Расчет проектной урожайности в зависимости от водного режима мелиорируемых земель // Гидротехника и мелиорация. – 1986. – № 9. – С. 52-56.
- [25] Мустафаев Ж. С. Влияние изменения климата на водообеспеченность сельскохозяйственных угодий в зонах недостаточного увлажнения Казахстана // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 105-113.
- [26] Мустафаев Ж. С. О генетической (гносеологической) теории мелиорации сельскохозяйственных земель // Природообустройство. – 2023. – № 2. – С. 23-27.
- [27] Мустафаев Ж. С. Физико-математическое моделирование процесса выщелачивания солей из почвы // Плодородие почв Казахстана. – Алматы: Наука, 1986. – С. 64-72.
- [28] Волобуев В. Р. Расчет промывки засоленных почв. – М.: Колос, 1975. – 203 с.
- [29] Мустафаев Ж. С., Рябцев А. Д. Адаптивно-ландшафтные мелиорации земель в Казахстане. – Тараз: BIG NEO Service, 2012. – 528 с.
- [30] Mustafayev Z., Skorintseva I., Toletayev A., Bassova T., Aldazhanova G. Assessment of climate change in natural areas of the Turkestan region of the republic of Kazakhstan for the purposes of sustainable agricultural and recreational nature management // GeoJournal of Tourism and Geosites. – 2023. – Vol. 46 (1). – P. 70-77.
- [31] Mustafayev Zh., Tuletayev A., Kuderin A. Assessment of thermal and natural moisture provision in territory of Turkestan region of the republic of Kazakhstan in changing climate conditions // Bulletin of KazNU, geographical series. – 2023. – No. 1 (68). – P. 74-84.
- [32] Mustafayev Z., Toletayev A., Skorintseva I., Aldazhanova G. // Indonesian Journal of Geography. – 2023. – Vol. 55, No. 2. – P. 352-360.

## REFERENCES

- [1] The national standard of the Russian Federation. GOST R 58331.3–2019. Reclamation systems and structures. Water demand for irrigation of agricultural crops. General requirements of GOST dated March 15, 2019. – № 58331.3 – 2019 (in Russ.).
- [2] Computer program «Calculation of parameters of crop irrigation regimes» (ROCK.xls). Certificate of official registration of a computer program for No. 2004610996. – April 22, 2004 (in Russ.).

- [3] Computer program «Calculation of the dynamics of agroclimatic resources and their regulation» State registration certificate No. 2009610137, registration date January 11, 2009 (in Russ.).
- [4] Guidelines for rationing irrigation taking into account the adjustment of biological coefficients, differentiation of soil and climatic conditions and spatiotemporal variability of hydrometeorological factors: method. guidelines. M., 2022. 80 p. (in Russ.).
- [5] Ibatullin S. R., Kwan R. A., Paramonov A. I., Balgabayev N. N. Rationing of irrigation in water basins of Kazakhstan. Taraz, 2008. 122 p. (in Russ.).
- [6] Alpatiev A. M. Moisture cycles in nature and their transformations. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 323 p. (in Russ.).
- [7] Ivanov N. N. On the determination of evaporation values // News of the Russian Geographical Society. 1954. Vol. 86, No. 2. P. 189-196 (in Russ.).
- [8] Ilyinskaya I. N. Rationing of water consumption for irrigation of agricultural crops in the North Caucasus. Novochoerkassk: SRSPU, 2001. 164 p. (in Russ.).
- [9] TKP 45-3.04-178-2009 (02250) – Irrigation systems. Design standards: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Entered into force on December 29, 2009. Minsk, 2010. 74 p. (in Russ.).
- [10] Stulina G.V., Solodky G. F. Using improved FAO methodology to estimate crop water use during irrigation in Central Asia. Tashkent, 2020. 127 p. (in Russ.).
- [11] Saipov B. Natural reclamation zoning of mountainous areas and optimization of irrigation regimes for agricultural crops in Kyrgyzstan: Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Agricultural Sciences. Bishkek, 1998. 50 p. (in Russ.).
- [12] Ostapchik V. P. Information and advisory irrigation management system. Kyiv: Urozhay, 1989. 248 p. (in Russ.).
- [13] Cheremisinov A. A., Cheremisinov A. Yu. Review of calculation methods for determining evapotranspiration of irrigated agricultural fields // Scientific journal of the Russian Research Institute for Land Reclamation Problems. 2016. No. 1 (21). P.113-133 (in Russ.).
- [14] Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc. R. Soc., London, 1948. Vol. 193. P. 120-145 (in Russ.).
- [15] Penman X. L. Plant and moisture. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 161 p. (in Russ.).
- [16] Shchedrin V. N., Dokuchaeva L. M., Yurkova R. E. On the substantiation of environmental standards for water requirements of various types of soils to optimize the reclamation state and soil fertility // Scientific journal of the Russian Research Institute for Reclamation Problems. 2018. No. 1 (29). P. 105-121 (in Russ.).
- [17] Mustafayev Zh. S., Ryabtsev A. D., Kozykееva A. T., Kenenbaev T. S., Sabdenaliev A. M. Basic principles for rationing water demand in agricultural landscapes // Water Management of Kazakhstan. 2009. No. 2. P. 3-12 (in Russ.).
- [18] Parfenova N. I. Energy basis for the formation of soil fertility // Issues of land reclamation. 2002. No. 2. P. 64-70 (in Russ.).
- [19] Kireycheva L. I. Assessment of the effectiveness of irrigation reclamation in the zonal series of soils // Soil Science. 2015. No. 5. P. 587-596 (in Russ.).
- [20] Manukyan D. A. Assessing the environmental safety of the functioning of irrigation and drainage systems using thermodynamic indicators // Nature Management. 2008. No. 2. P. 45-50 (in Russ.).
- [21] Mustafayev Zh. S. Ecological profile of agricultural land reclamation // Nature Management. 2022. No. 2. P. 13-22 (in Russ.).
- [22] Orlova I. V. Taking into account geo-ecological restrictions in the territorial planning of irrigation reclamation // Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2014. No. 1 (13). P. 147-157 (in Russ.).
- [23] Budyko M. I. Heat balance of the earth's surface. L.: Gidrometeoizdat, 1956. 255 p. (in Russ.).
- [24] Nikolsky Yu. N., Shabanov V. V. Calculation of design yield depending on the water regime of reclaimed lands // Hydrotechnics and land reclamation. 1986. No. 9. P. 52-56 (in Russ.).
- [25] Mustafayev Zh. S. Impact of climate change on water supply of agricultural land in zones of insufficient moisture in Kazakhstan // Nature Management. 2022. No. 5. P. 105-113 (in Russ.).
- [26] Mustafayev Zh. S. On the genetic (gnoseological) theory of agricultural land reclamation // Nature Management. 2023. No. 2. P. 23-27 (in Russ.).
- [27] Mustafayev Zh. S. Physico-mathematical modeling of the process of leaching salts from soil // Soil Fertility of Kazakhstan. Almaty: Science, 1986. P. 64-72 (in Russ.).
- [28] Volobuev V. R. Calculation of leaching of saline soils. M.: Kolos, 1975. 203 p. (in Russ.).
- [29] Mustafayev Zh. S., Ryabtsev A. D. Adaptive landscape land reclamation in Kazakhstan. Taraz: BIG NEO Service, 2012. 528 p. (in Russ.).
- [30] Mustafayev Z., Skorintseva I., Toletayev A., Bassova T., Aldazhanova G. Assessment of climate change in natural areas of the Turkestan region of the Republic of Kazakhstan for the purposes of sustainable agricultural and recreational nature management // GeoJournal of Tourism and Geosites. 2023. No. 46 (1). P. 70-77.
- [31] Mustafayev Zh., Tuletayev A., Kuderin A. Assessment of thermal and natural moisture provision in territory of Turkestan region of the republic of Kazakhstan in changing climate conditions // Bulletin of KazNU, geographical series. 2023. No. 1 (68). P. 74-84.
- [32] Mustafayev Z., Toletayev A., Skorintseva I., Aldazhanova G. // Indonesian Journal of Geography. 2023. Vol. 55, No. 2. P. 352-360.

Ж. С. Мустафаев<sup>1</sup>, А. А. Кудерин<sup>2</sup>, А. Н. Омаров<sup>3</sup>, А. Б. Түлетаяев\*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Т. ғ. д., бас ғылыми қызметкер

(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; [z-mustafa@rambler.ru](mailto:z-mustafa@rambler.ru))

<sup>2</sup> PhD доктор, аға ғылыми қызметкер

(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; [kuderin@list.ru](mailto:kuderin@list.ru))

<sup>3</sup> Ғылыми қызметкер

(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; [omaraidos@inbox.ru](mailto:omaraidos@inbox.ru))

<sup>4\*</sup> PhD докторант (Әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; [hat\\_0512@mail.ru](mailto:hat_0512@mail.ru))

### ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ КЕҢІСТІКТІК-УАҚЫТТЫҚ ӨЗГЕРГІШТІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ АЛҚАПТАРЫ МЕН ДАҚЫЛДАРЫНЫҢ СУ ТҰТЫНУЫН НОРМАЛАУ

**Аннотация.** Мақалада табиғи жүйенің климаттық, гидрологиялық, топырақ және биологиялық көрсеткіштерінің кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін ескере отырып, ауыл шаруашылығы алқаптары мен дақылдарының су тұтынуын экологиялық нормалау бойынша әзірленген есептеу әдістемесі келтірілген. Ауыл шаруашылығы алқаптары мен дақылдарының су тұтыну тапшылығы түріндегі антропогендік жүктеме гидроагроландшафттарындағы топырақ түзілу процестерін мақсатты реттеу мен басқаруды қамтамасыз ететін табиғи жағдайларды ескере отырып, жылудың, ылғалдың және қоректік заттардың энергетикалық теңгерімділігі қағидаттарына негізделуі тиіс. Ауыл шаруашылығының су тұтынуын бағалаудың әзірленген моделі мен алгоритмі су тұтынуды нормалаудың екі моделін пайдаланумен құрылған – ауыл шаруашылығы алқаптары мен дақылдары үшін, яғни бұл суармалы егіншілік жағдайында табиғатты пайдаланудың ең маңызды өлшемдерін анықтауға мүмкіндік береді және халықтың азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуде үлкен маңызға ие.

**Түйін сөздер:** агроландшафт, ауыл шаруашылығы алқаптары мен дақылдары, биология, климат, су тұтыну, топырақ, топырақ түзілуі.

Zh. S. Mustafayev<sup>1</sup>, A. A. Kuderin<sup>2</sup>, A. N. Omarov<sup>3</sup>, A. B. Tuletayev\*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher

(JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; [z-mustafa@rambler.ru](mailto:z-mustafa@rambler.ru))

<sup>2</sup> PhD, Senior researcher (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; [kuderin@list.ru](mailto:kuderin@list.ru))

<sup>3</sup> Researcher (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; [omaraidos@inbox.ru](mailto:omaraidos@inbox.ru))

<sup>4\*</sup> PhD doctoral (Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan; [hat\\_0512@mail.ru](mailto:hat_0512@mail.ru))

### RATING OF WATER CONSUMPTION OF AGRICULTURAL LANDS AND CROPS TAKEN INTO ACCOUNT OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS

**Abstract.** The article presents the developed calculation methodology for environmental regulation of water consumption of agricultural land and crops, taking into account the spatiotemporal variability of climatic, hydrological, soil and biological indicators of the natural system. It is noted that the human pressure in the form of a deficit in water consumption of agricultural land and crops should be based on the principles of energy balance of heat, moisture and nutrients, taking into account natural conditions that ensure targeted regulation and management of soil-forming processes in hydro-agrolandscapes. The developed model and algorithm for assessing water consumption in agriculture are built using two models for rationing water consumption - agricultural land and crops, which makes it possible to determine the most important criteria for environmental management in irrigated agriculture and is of great importance in ensuring food security of the population.

**Keywords:** agricultural landscape, agricultural land and crops, biology, climate, soil, soil formation, water consumption.