

СИСТЕМА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИРРИГАЦИОННОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА

Жемухов Р.Ш.¹, Жемухова М.М.¹, Алоев Т.Б.¹, Асланова Е.М.¹

¹ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», Нальчик, Россия (360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), e-mail: bsk@kbsu.ru

Работа посвящена глобальным антропогенным изменениям климата и его последствиям для сельского хозяйства на региональном уровне. В качестве объекта исследования взята существующая оросительная система в Ставропольском крае. Территория оросительной системы предварительно разбита на камеры по климатическим и почвенным характеристикам. Вне рассматриваемой модели решена задача размещения сельскохозяйственного производства и получена оптимальная структура сельскохозяйственного производства. Далее, после расчета режима орошения и оросительных норм для сельскохозяйственных культур на имитационной модели функционирования водохозяйственной системы рассчитывается ирригационное водопотребление с использованием полученной структуры сельскохозяйственного производства. При построении имитационной модели функционирования водохозяйственной системы использован агрегативный подход, выделены основные элементы оросительной системы – створ, водохранилище, устройство управления, внешняя среда.

Ключевые слова: математическая модель, имитационная модель, режим орошения, оросительная норма, водопотребление, изменение климата

THE SYSTEM OF MATHEMATICAL MODELS FOR ASSESSMENT OF IRRIGATION WATER CONSUMPTION UNDER ANTHROPOGENIC CLIMATE CHANGE

Zhemukhov R.S.¹, Zhemukhova M.M.¹, Alov T.B.¹, Aslanova E.M.¹

¹»Kabardino-Balkarian state University. H. M. Berbekov», Nalchik, Russia (360004, Nalchik, street Chernyshevsky, 173), e-mail: bsk@kbsu.ru

The work is devoted to global anthropogenic climate change and its impacts on agriculture at the regional level. As the object of study is taken, the existing irrigation system in the Stavropol region. The territory of the irrigation system is pre-divided into chambers by climatic and soil characteristics. Outside the model solved the problem of locating agricultural production and the resulting optimal structure of agricultural production. Further, calculating the irrigation regime and irrigation rates for crops in the simulation model for operation of water system irrigation water consumption is calculated using the obtained patterns of agricultural production. When building a simulation model of the operation of water systems used aggregative approach, highlights the key elements of the irrigation system - the target, a reservoir, a control device, the external environment.

Keywords :mathematical model, simulation model, irrigation regime, irrigation rate, water consumption, climate change.

Исследования климатологов, посвященные антропогенному потеплению из-за увеличения концентрации CO_2 , свидетельствуют об изменениях приземной температуры воздуха и осадков. Это влечет за собой изменение условий естественного увлажнения территорий, отражается на объемах и режимах речного стока и ирригационной водопотребности и в конечном счете изменяет условия эксплуатации водохозяйственных систем (ВХС). Кроме того, из-за того, что время наступления значимых климатических аномалий сравнимо со временем проектирования крупных водохозяйственных объектов, недоучет подобных изменений может привести к значительным экономическим и экологическим ущербам. Особенно чувствительными к возможным изменениям климата

оказываются ВХС ирригационного назначения. В подобных системах при изменениях климата меняется не только сток, но и водопотребление. Следовательно, для различных сценариев изменения климата задача получения репрезентативных рядов ирригационной водопотребности с межгодовой и внутрисезонной изменчивостью и детальностью, достаточной для проведения водохозяйственных расчетов [6], является актуальной.

Исследования по этому вопросу представлены в работах [1-4, 7, 8]. Однако их результаты не предназначены для оценки режимов водопотребности с детальностью, необходимой для решения задач регулирования стока.

В [9,10] рассматриваются математические модели продуктивности сельскохозяйственных культур и приводятся оценки изменения их продуктивности при глобальном потеплении. Оценка оросительных норм и режимов орошения получается в этих моделях как «побочный эффект» при проведении расчетов. Вместе с тем, как отмечают некоторые авторы, подобные модели являются весьма требовательными к исходной информации гидрометеорологического содержания.

Анализ различных моделей, приведенный в [4, 5], позволил выбрать в качестве базовой модель, основанную на методе А.И. Будаговского. Преимущества этого метода обусловлены его универсальностью, выделением в явном виде «климатических» переменных, а также обеспеченностью исходной информацией.

Рассматривается орошаемый массив площадью S , содержащий N культур. Площадь, занимаемая каждой культурой, равна S_n . Для каждой культуры предполагается набор агрофизических параметров и технико-экономических характеристик. Для орошаемого массива задан набор метеорологических характеристик в виде длительных рядов наблюдений с месячной или декадной разбивкой.

Задача состоит в оценке изменений объемов и режимов водопотребности для различных сценариев изменения климата и определении ущербов, возникающих от недоучета глобальных климатических изменений. Трудности решения этой задачи обусловлены: (1) неопределенностью и значительным временным и территориальным агрегированием сценариев климата; (2) недостаточным количеством параметров, представляемых в сценариях климата; (3) отсутствием репрезентативных рядов наблюдений за водопотребностью земледелия (в целях верификации модели) из-за изменения структуры производства, экономических и агротехнических условий возделывания культур и т.д.

Сформулированная задача решалась для условий Кабардино-Балкарской республики (КБР) за 1944–2004 гг. и Лево-Егорлыкской оросительной системы Ставропольского края (ЛЕООС, 1956–1985 гг.).

Рассмотрим описание метода А.И. Будаговского, ориентированного на расчет режимов орошения и переменных оросительных норм применительно к оросительной системе.

Оросительная норма является составляющей уравнения водного баланса орошаемых почв, которое можно записать в виде:

$$W_{ij}^k - W_{ij}^n = H_i + O_{ij}^n - E_{ij}^c + Q_{ij},$$

где W_{ij}^n, W_{ij}^k - запасы воды в корнеобитаемом слое почвы в i -ой камере под j -ой культурой в начале и конце расчетного интервала; H_i - сумма атмосферных осадков в i -ой камере; O_{ij}^n - оросительная норма j -ой культуры в i -ой камере; E_{ij}^c - суммарное испарение в i -ой камере под j -ой культурой; Q_{ij} - вертикальный водообмен корнеобитаемой зоны почвы с нижележащими слоями или с грунтовыми водами.

Решив это уравнение относительно O_{ij}^n и принимая во внимание, что $Q_{ij} = 0$ (в начале сезона орошения грунтовые воды залегают глубоко), получаем:

$$O_{ij}^n = E_{ij}^c - H_i - \Delta W_{ij},$$

$$\text{где } \Delta W_{ij} = W_{ij}^n - W_{ij}^k.$$

Поскольку в последнем уравнении величина атмосферных осадков задается по результатам непосредственных наблюдений, то определение оросительных норм сводится к расчетам испарения с орошаемых полей и влагозапасов в почве.

Для определения влагозапасов на конец расчетного интервала времени в почве предложена зависимость:

$$W_{ijk}^k = W_{ijk}^n (1 - m_{ijk} \tau_k) - k_{ijk}^1 \tau_k,$$

где W_{ijk}^k, W_{ijk}^n - влагозапасы на конец и начало k -ой декады для j -ой культуры в i -ой камере; τ_k - продолжительность k -го расчетного интервала в днях; m_{ijk}, k_{ijk}^1 - коэффициенты, подробно описанные в [2].

Сроки полива определяются (при условии $W_{ijk}^k \leq W_{ijk}^n$) из последнего уравнения в

$$\text{предположении, что } W_{ijk}^k = W_{ijk}^{kp} : \tau_k = \frac{W_{ijk}^n - W_{ijk}^{kp}}{m_{ijk} W_{ijk}^n - k_{ijk}^1},$$

W_{ijk}^{kp} - критические влагозапасы, определяемые из

$$W_{ijk}^{kp} = 60 + 4.2 E_{ijk}^{TO},$$

где E_{ijk}^{TO} - испарение за счет транспирации при сомкнутом растительном покрове.

Поливная норма Π_{ijk}^H определяется:

$$\Pi_{ijk}^H = W_{нс} - W_{ijk}^{kp},$$

где $W_{нс}$ – наименьшая влагоемкость почвы.

Суммарное испарение определяется по уравнению:

$$E_{ijk}^c = E_{ijk}^{TO} [1 - Y(\omega_{ijk}^o)] + M_{ijk} Y(\omega_{ijk}^o) E_{ijk}^{PO},$$

где E_{ijk}^{PO} – испарение с оголенной почвы; $Y(\omega_{ijk}^o)$ – функция относительной площади листьев j -ой культуры в k -ую декаду в i -ой камере, определяемая $e^{-0.45 \omega_{ijk}^o}$; M_{ijk} – коэффициент, определяемый:

$$M_{ijk} = 1 - (1 - \gamma W_{ijk}^T) e^{-\frac{H_{ik}}{E_{ijk}^{PO}}},$$

где W_{ijk}^T – текущие влагозапасы в i -ой камере под j -ой культурой в k -ую декаду ($W_{ijk}^T = (W_{ijk}^H + W_{ijk}^k) / 2$); γ – эмпирический коэффициент, зависящий от характера почвы.

Для оценки испарений за счет транспирации и с оголенной почвы предложены следующие зависимости:

$$E_{ijk}^{TO} = a_1 b_{ik}^1 u_k^{2/3} \Phi_j^1 d_{ik} + a_2 b_{ik}^2 \Phi_j^2 (R_{ik} - B_{ik}),$$

$$E_{ijk}^{PO} = a_1 b_{ik}^1 D_k d_{ik} + a_2 b_{ik}^2 (R_{ik} - B_{ik}),$$

где a_1, a_2 – переводные множители; b_{ik}^1, b_{ik}^2 определяются по следующим зависимостям: $b_{ik}^1 = \frac{1}{1 + \frac{L \cdot 0,622 \cdot \varphi_{ik}'}{C_p \cdot P}}$, $b_{ik}^2 = \frac{L \cdot 0,622 \cdot \varphi_{ik}' \cdot b_{ik}^1}{C_p \cdot P}$,

$$\varphi_{ik}' = \frac{24513}{(235 + t_{ik})^2} e^{\frac{17,1 \cdot t_{ik}}{(235 + t_{ik})}},$$

где L – скрытая теплота парообразования, равная 600 кал/г; d_{ik} – дефицит влажности воздуха, мб; u_k – скорость ветра на высоте 2 м, м/с; R_{ik} – радиационный баланс, кал.см⁻².мин⁻¹; B_{ik} – теплообмен в почве, кал.см⁻².мин⁻¹; Φ_j^1, Φ_j^2 – интегральные функции характеристик, описывающих тепло и влагообмен в растительном покрове; D_k – коэффициент турбулентной проводимости слоя воздуха, расположенного между поверхностью почвы высотой 2 м, см/с; t_{ik} – среднее значение температуры воздуха за

рассматриваемый отрезок времени, град; P – атмосферное давление, мб; C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кал/г.град.

Оросительная норма – нетто определяется как сумма поливных норм:

$$G_{ij}^H = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \Pi_{ijk}^H .$$

Расход воды – нетто (в м³/с) на каждую культуру в выделенной камере для обеспечения заданного полива, определяем по формуле

$$G_{ijk}^{расх} = \frac{\Pi_{ijk}^H S_i \alpha_{ij}}{100 \cdot 86400 \cdot P_j^{\Pi} \cdot C} ,$$

где S_i — площадь i -ой камеры, га; α_{ij} — % площади, занятой j -ой культурой в i -ой камере; P_j^{Π} — продолжительность полива j -ой культуры, сут.; $c = a/24$, a — суточная продолжительность полива, час; 86 400 — число секунд в сутках.

Величина

$$G_k = \sum_i \sum_j G_{ijk}^{расх}$$

характеризует водопотребность системы (региона) в целом в k -ый расчетный интервал времени — укомплектованный гидромодуль.

Ниже приводятся результаты расчетов режимов орошения и оросительных норм для различных сельскохозяйственных культур по годам для условий КБР и ЛЕООС (рис. 1-3) Как видно из рисунков, полученные результаты совпадают с результатами из различных литературных источников.

Вместе с тем были проведены расчеты режимов орошения и оросительных норм при различных сценариях изменений климата и получены соответствующие ирригационные водопотребности для условий ЛЕООС (рис. 4). Полученные результаты свидетельствуют о приемлемости предложенной системы математических моделей для оценки ирригационной водопотребности при антропогенных изменениях климата.

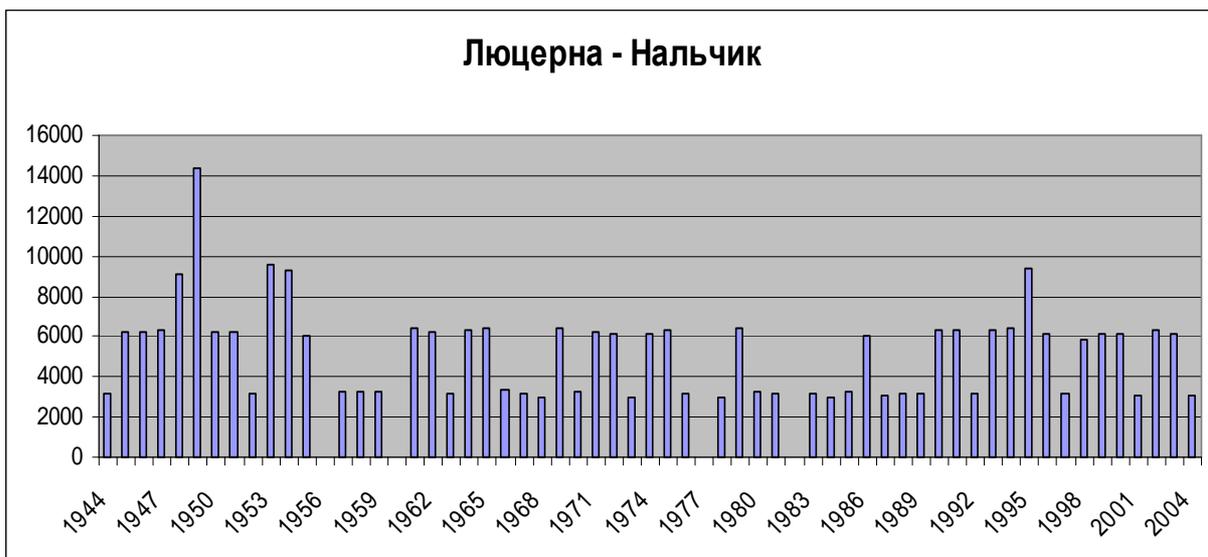


Рис. 1. Оросительные нормы для люцерны по годам, м³/га, м/с Нальчик



Рис. 2. Оросительная норма для кукурузы на силос по годам, м³/га, м/с Нальчик

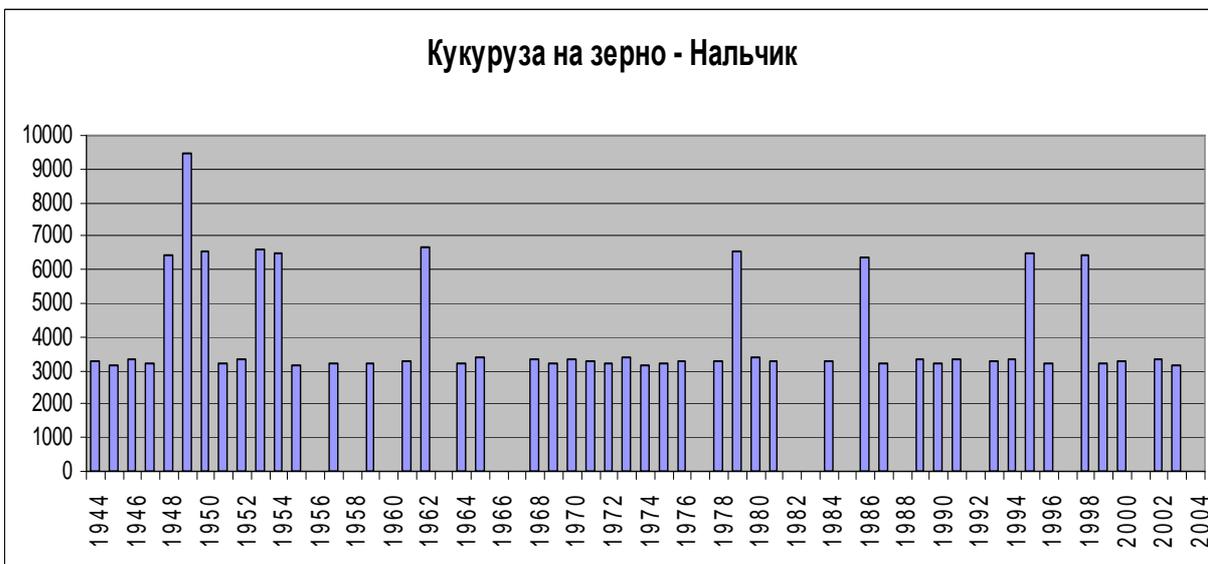


Рис. 3. Оросительная норма для кукурузы на зерно по годам, м³/га, м/с Нальчик



Рис. 4. Ирригационное водопотребление для Лево-Егорлыкской оросительной системы Ставропольского края (1956–1985 гг.)

Список литературы

1. Будаговский А.И., Бусарова О.А. Основы метода оценки изменений ресурсов почвенных вод и речного стока по различным сценариям изменения климата // Водные ресурсы . — 1991. — № 2. — С. 5–16.
2. Винников К.Я., Лемешко Н.А., Сперанская Н.А. Влагосодержание почвы и сток в нетропической части Северного полушария при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. — 1990. — № 3. С. 5–10.
3. Винников К.Я., Лемешко Н.А. Влагосодержание почвы и сток для территории СССР при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. — 1987. — № 12. С. 96–103.
4. Волков В.С., Доброумова С.С., Иванова Л.П. Оценка различных методов расчета оросительных норм и режимов орошения сельскохозяйственных культур (на примере Ростовской и Саратовской областей). Труды ГГИ. — 1990. Вып. 341. — С. 27–34.
5. Воропаев Г.В., Местечкин В.Б.//Методы определения суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур в зоне орошаемого земледелия СССР. М.: Наука. 1987. Вып.8. — С. 11–26.
6. Жемухов Р.Ш., Асланова Е.М., Жемухова М.М., Алоев Т.Б. Автоматизация водохозяйственных расчетов для оросительной системы на основе агрегативного подхода // Проблемы современной науки и образования. — 2015. — № 2(32). — С. 120–124.

7. Лемешко Н.А. Региональные изменения влагосодержания почвы и суммарного стока при современных изменениях глобального климата. Труды ГГИ. Л., Гидрометиздат. — 1988. Вып. 330. С. 126–131.
8. Лемешко Н.А. Оценка влияния изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков на влагосодержание почвы. труды ГГИ. Л., Гидрометиздат. — 1988. Вып. 330. С. 132–138.
9. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л., Гидрометиздат. — 1981. — 232 с.
10. Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Стохастическая модель климата для расчета продуктивности агроэкосистем // Метеорология и гидрология. — 1988. № 7. С. 105–114.

Рецензенты:

Ашабоков Б.А., д.ф.-м.н., профессор, зав. отделом математических методов исследования сложных систем и процессов ФГБУН «Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН», г. Нальчик;

Хачев М.М., д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. высшей математики, ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова», г. Нальчик.