

СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕЖИМОВ ОРОШЕНИЯ, НОРМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА

В. П. Ковальчук

Институт водных проблем и мелиорации НААН

г. Киев, Украина

Ключевые слова: сценарный анализ, многослойные модели влагопереноса, режимы орошения, нормы водопотребления и водоотведения, информационно-аналитическая система, инфильтрация за расчетный слой, дефицит водного баланса.

Постановка задачи

Возрождение орошения в Украине требует проведения исследований по научному обоснованию нормированного водопользования. К настоящему времени при нормировании и регулировании водопользования в странах содружества независимых государств [1], моделировании проектных режимов орошения [2] и в системах оперативного планирования поливов [3], использовались двухслойные балансовые модели. Однако возникает необходимость разработки более совершенных информационных систем с использованием термодинамических моделей влагопереноса в грунтах [4]. Этот подход позволяет более детально учитывать свойства почв, особенности протекающих в них процессов и специфику применяемых режимов орошения.

Ставится задача разработать методологию сценарного анализа для имитационного моделирования разных вариантов режимов орошения сельскохозяйственных культур с оценкой уровня использования водных ресурсов и определения величины фильтрации за расчетный слой почвы (водоотведения). Такая методология дает возможность ресурсной, экологической и экономической оптимизации водопользования, разработки оросительных норм и норм водоотведения.

Методология сценарного анализа

Сценарный анализ предназначен для исследования ресурсной и экологической эффективности режимов орошения, определения оросительных норм и величин фильтрации воды за пределы расчетного слоя почвы. В основу методологии положен имитационно-игровой метод в природопользовании [4, 5]. Имитация сценариев осуществляется на основе модели влагопереноса в грунтах, которая использует одномерное нелинейное уравнение вертикального влагопереноса [4, 5].

Оптимизационный подход к анализу используемых ресурсов и величины инфильтрации при разных режимах орошения базируется на модели игры с природой [4]. При этом

вариантами активного игрока выбраны разные режимы орошения, а вариантами природы — годы разной влагообеспеченности (за дефицитом водного баланса).

Имитационное моделирование вариантов проводят по многослойной математической модели [4,5] на основе одномерного дифференциального уравнения движения грунтовой влаги, которое описывает насыщенно-ненасыщенный грунтовый поток в неоднородном почвенном профиле:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n) \frac{\partial \Psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)}{\partial z} - k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n) \right] - I_s(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n), \quad (1)$$

где θ — объемная влажность почвы, % об.; $\Psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)$ — водный потенциал, см вод.ст.; $k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)$ — коэффициент влагопроводности, см/сут; $I_s(z)$ — функция «внутренних источников» влаги, % об./сут; z — вертикальная координата, см; τ — время, сутки; η_1, \dots, η_n — параметры (физические свойства почвы послойно).

Идентификация параметров уравнения (1) осуществляется в программе «ROSETTA» [6], основанной на многослойной полуэмпирической модели Ван-Генухтена, где гидрофизические функции, индивидуальные для различных слоев почв, распределены по глубине почвенного профиля. Количество физических слоев в имитированной зоне аэрации определяется степенью дифференциации почвенного профиля по их гидрофизическим свойствам:

$$k = k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n), \quad \Psi = \Psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n). \quad (2)$$

Переход к разностной аппроксимации уравнения (1) позволяет получить систему разностных уравнений многослойной математической модели. Программный комплекс разработанной информационно-аналитической системы (ИАС) [7] реализует сценарный анализ поливных режимов в годы различной водообеспеченности для получения величин оросительных норм и значений инфильтрации влаги на различных глубинах за определенный период времени (в частности, за период вегетации).

Критерии оценки вариантов имитационного моделирования

Для оценки величины фильтрации за расчетный слой h используется суммарный поток влаги на интервале времени $[t_0; t_1]$ через плоскость z , который определяется по зависимости [4]:

$$Q(\tau_0, \tau_1, m) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} q(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $Q(\tau_0, \tau_1, m)$ — инфильтрация за пределы расчетного слоя почвы;
 $q(\tau)$ — интенсивность инфильтрации.

При исследовании эффективности режимов орошения критерий оценивает инфильтрацию (положительное значение) за расчетный слой h или подпитывание из нижележащих слоев (отрицательное значение) за период вегетации сельскохозяйственной культуры.

Технологическим критерием при имитации оперативного управления поливами является критерий средней влажности почвы в расчетном слое. Для этого в многослойной модели рассчитывается средняя влажность почвы на основе эпюры влажности почвы по глубине [4]:

$$\theta_{h\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i}{m}, \quad (4)$$

где θ_i — влажность почвы в i -м слое; m — число слоев разностной математической модели, которые образуют расчетный слой h .

Численные эксперименты

В результате численного моделирования с использованием ИАС определяются величины оросительных норм U , инфильтрации за расчетный слой почвы Q в зависимости от уровня грунтовых вод H , выращиваемой культуры K , типа почвы h [8], для года разной водообеспеченности по дефициту водного баланса q , режиму орошения R , что можно представить в виде функции:

$$(U, Q) = F(K, H, h, q, R) \quad (5)$$

Эксперимент проводится с использованием дерева планирования (рис. 1). Производится выбор культуры (K_1 — озимая пшеница или K_2 — кормовая свекла), фиксируется тип почвы (h_1 — каштановые на лессах; h_2 — чернозем южный на лессах [8]). Далее согласно дереву численный эксперимент проводится при $H_1 = 3$ м — глубокое залегание уровня грунтовых вод (УГВ); или при $H_2 = 1,5$ м — близкое залегание УГВ. Расчеты проводятся на погодные условия четырех лет расчетной обеспеченности по дефициту водного баланса (сухой (97,6 %) — 1968 год; среднесухой (73,8 %) — 1948 год; средневлажный (26,2 %) — 1970 год; влажный (2,4 %) — 1961 год) и четырех вариантов режимов орошения (рис. 1).

Параметры режимов орошения в рассматриваемых вариантах были выбраны из предположения (условия) последовательного снижения инфильтрации за расчетный слой почвы в процессе полива на протяжении вегетации, включая контрольный вариант — богарные условия:

а) Биологически оптимальный — обеспечивает биологически оптимальные условия выращивания культур (влажность от $W_{\text{кр}}$ до $W_{\text{нв}}$ в слое 0,9 м, поливная норма 500 м³/га). Критическая влажность (передполивной порог) — 0,22 (в долях единицы), что соответствует для черноземов южных на лессах — 70 % НВ.

б) Водосберегающий режим I — обеспечивает водосбережение и уменьшение инфильтрации за счет уменьшения поливных норм до 350 м³/га (расчетный слой составляет

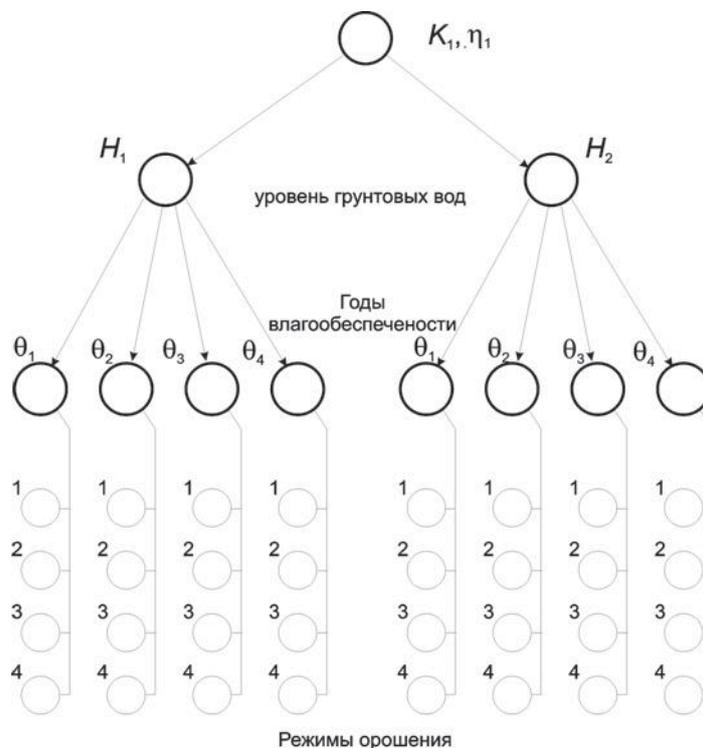


Рисунок 1 — Дерево проведения эксперимента для исследования зависимости оросительных норм и инфильтрации за расчетный слой почвы от параметров: H — уровень грунтовых вод ($H_1=1,5$ м; $H_2=3$ м); K — культуры (K_1 — озимая пшеница; K_2 — кормовая свекла); h — тип почвы (h_1 — каштановые на лессах; h_2 — чернозем южный на лессах); q — годы влагообеспеченности (q_1 — влажный, q_2 — средневлажный, q_3 — среднесухой, q_4 — сухой); 1, 2, 3, 4 — режимы орошения.

0,60 м, передполивной порог — 0,22). Уменьшение инфильтрации и водосбережение предполагается вследствие того, что поливная норма 350 м³/га доводит влажность расчетного слоя лишь до 0,28.

в) Водосберегающий режим II — обеспечивает уменьшение инфильтрации и водосбережение за счет снижения величины поливной нормы до 350 м³/га при уменьшении расчетного слоя с 0,90 до 0,60 м. При этом влажность почвы удерживается выше 0,19 (в долях единицы), что для черноземов южных на лессах соответствует 60 % НВ. При поливной норме 350 м³/га и передполивном пороге 0,19 влажность расчетного слоя почвы доводится до 0,26, что значительно меньше НВ. Уменьшение инфильтрации при этом и есть резерв ресурсосбережения.

Результаты численных экспериментов

В качестве примера, на основе сценарного моделирования с применением ИАС получены варианты расчетов динамики влажности почвы при выращивании озимой пшеницы и разных режимах орошения в сухой год 97,6 % расчетной обеспеченности по дефициту водного баланса (рис. 2). Расчеты влажности почвы для чернозема южного на лессах

при близком 1,5 м в сравнении с глубоким 3 м залеганием уровней грунтовых вод показывают уменьшение числа поливов (рис. 2), и соответствующее снижение оросительных норм (табл. 1). Анализ показывает, что при научно обоснованном проведении поливов

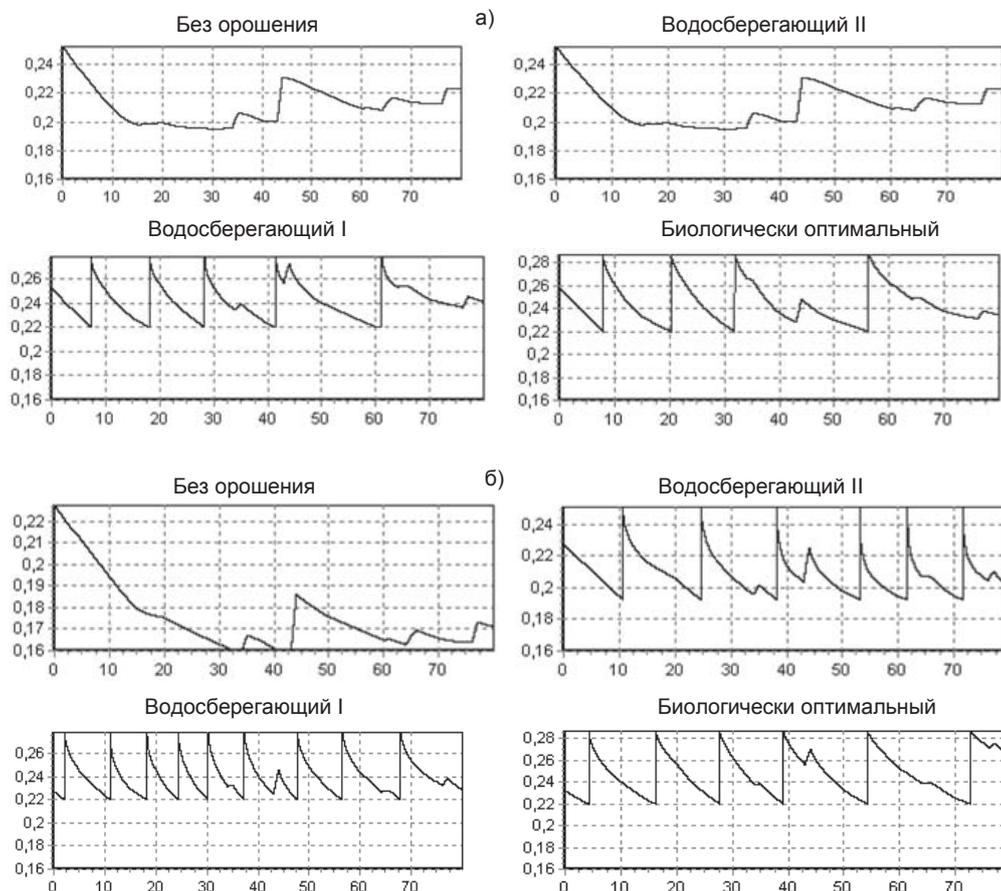


Рисунок 2 — Динамика влажности почвы по вариантам режимов орошения в сухой год 97,6 % расчетной обеспеченности для черноземов южных на лессах: а) при УГВ = 1,5 м; б) УГВ = 3 м

Таблица 1 — Оросительные нормы ($m^3/га$) в годы разной влагообеспеченности, при различных режимах орошения и уровнях грунтовых вод

Год	Дефицит обеспеченности (%)	Режимы орошения			
		Без орошения	Водосберегающий II	Водосберегающий I	Биологически оптимальный
УГВ = 1,5 м					
1968	97,6	0	0	1750	2000
1948	73,8	0	0	1050	1500
1970	26,2	0	0	700	500
1961	2,4	0	0	350	500
УГВ = 3 м					
1968	97,6	0	2100	3150	3000
1948	73,8	0	1050	2800	2000
1970	26,2	0	350	1750	1500
1961	2,4	0	350	1050	1000

возможна только незначительная фильтрация воды за расчетный слой почвы при применении биологически оптимальных режимов орошения (табл. 2). При близком залегании грунтовых вод за счет подпитки грунтовыми водами наблюдается существенная экономия водных ресурсов, особенно при применении водосберегающих режимов орошения (табл. 2), а также увеличение влажности почвы в богарных условиях (рис. 2).

Таблица 2 — Инфильтрация (м³/га) за расчетный слой (подпитка расчетного слоя, если в таблице отрицательные значения) при близком и глубоком залегании УГВ

Год	Дефицит обеспеченности (%)	Режимы орошения			Биологически оптимальный
		Без орошения	Водосберегающий II	Водосберегающий I	
УГВ = 1,5 м					
1968	97,6	-1243	-1243	-350	-142
1948	73,8	-952	-952	-267	-69
1970	26,2	-300	-300	-49	74
1961	2,4	-149	-149	44	86
УГВ = 3 м					
1968	97,6	-239	-122	-76	-60
1948	73,8	-158	-95	-62	-48
1970	26,2	-78	-63	-48	-36
1961	2,4	-66	-56	-41	-35

Выводы

1. Предложенная методика сценарного анализа проектных режимов орошения позволяет детально моделировать процессы влагопереноса в зависимости от типов и свойств почв, оценивать по вариантам оросительные нормы и нормы водоотведения.

2. Разработанная ИАС оценивает богарные условия и варианты режимов орошения в соответствии с деревом экспериментов, сравнивает процессы полива, оросительные нормы и нормы водоотведения для разных типов почв при глубоком и близком залегании УГВ.

3. Установлено, что при научно обоснованном проведении поливов инфильтрация воды за расчетный слой почвы практически отсутствует; при применении водосберегающих режимов орошения достигается существенная экономия водных ресурсов за счет подпитки расчетного слоя грунтовыми водами.

Библиографический список

1. Штаковский, А.В. О нормировании и регулировании водопользования в агропромышленном комплексе СССР и стран содружества независимых государств / А.В. Штаковский. — Рязань, ФГБОУ ВПО РГТУ: 2012. — 140 с.
2. Лихацевич, А.П. Моделирование проектного режима орошения / А.П. Лихацевич // Мелиорация. — 2010. — № 2 (64). — С. 19—26.
3. Остапчик, В.П. Информационно-советующая система управления орошением / В.П. Остапчик, В.А. Костромин, А.М. Коваль. — К.: Урожай, 1989. — 248 с.
4. Системна оптимізація водокористування при зрошенні. Монографія / П.І. Ковальчук, Н.В. Пендак, В.П. Ковальчук, М.М. Волошин. — Рівне: НУВГП, 2008. — 204 с.
5. Ковальчук, В.П. Імітаційно-ігровий метод сценарного моделювання в системах природокористування за умов невизначеності і ризику/ В.П. Ковальчук, Т.В. Матяш. // Математичне та комп'ютерне моделювання.

Серія: Технічні науки: зб.наукових праць. Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка. — Кам'янець-Подільський: К-ПНУ ім. Івана Огієнка,— 2010. — Вип.3. — С. 96—102.

6. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S.Salinity Laboratory ARS-USDA; <http://www.usssl.ars.usda.gov>.

7. Ковальчук, П.І. Інформаційно-аналітична система оцінки зміни стану та ефективності систем захисту від підтоплення та затоплення територій / П.І. Ковальчук, Т.О. Михальська, С.А. Шевчук, В.П. Ковальчук, Т.В. Матяш, О.С. Демчук // Водне господарство України. — 2009. — №6. — С. 52—53.

8. Атлас почв Украинской ССР/ Под ред.: Н.К.Крупского, Н.И. Полулана — К.: Урожай, 1979. —159 с.

Summary

V. Kovalchuk

SCENARIO ANALYSIS FOR PROJECT IRRIGATION REGIMES, WATER CONSUMPTION AND WATER REMOVAL NORMS BASED ON MULTILAYERED MOISTURE TRANSFER MODELS

Methodology of scenario analysis for modelling and evaluation of project irrigation regimes, determination of irrigation and water removal norms based on multilayered moisture transfer models is proposed. Information analysis system which enables to select and evaluate options for irrigation regimes by the certain tree of experiment is developed. It is given as an example the modeling of four options: one for rainfed conditions, another two for water-saving regimes and one more for biologically optimal irrigation regime for the years of different water probability to compare irrigation and water removal norms in case of low (3 m) and high (1.5 m) groundwater levels.

Поступила 15.01.14