

УДК 626.845

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ОРОШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПОЛИВАРИАНТНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИКИ АГРОЭКОСИСТЕМ*

С.А. МЕДВЕДЕВ, Р.А. ПОЛУЭКТОВ,
А.Г. ТОПАЖ

Ключевые слова: динамическая модель, поливариантный расчёт, оптимальное управление, обратная связь.

Keywords: dynamical model, multivariate computation, optimal control, feedback.

Описан компьютерный эксперимент с динамической моделью продукционного процесса яровой пшеницы, выполненный с использованием автоматизированной системы поливариантного расчёта с целью определения экономически оптимальной стратегии орошения для засушливых условий Нижнего Поволжья.

The computer case study with dynamical crop model in the framework of automated system of multivariate computation is presented. The paper objective was to determine the optimal strategy of crop irrigation for Lower Volga arid region.

Вопросы назначения сроков и норм поливов являются основными в орошаемом земледелии. В разные годы они решались по-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-05-00415

Полуэктов Ратмир Александрович, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией;

Топаж Александр Григорьевич, д-р техн. наук, старший научн. сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем;

Медведев Сергей Алексеевич, аспирант (Агрофизический НИИ, Санкт-Петербург).

разному. Использование нормативного метода, основанного на обобщении данных полевых и производственных опытов, приводит к неприемлемым ошибкам при расчётах. Поэтому наибольшее распространение в нашей стране получил водно-балансовый метод [1]. В его основе экспериментальное определение начальных влагозапасов в почве и расчёт суммарного испарения (реальной эвапотранспирации) с использованием подходящего приближённого метода. Разумеется, при этом должны быть известны основные гидрофизические характеристики почвы.

В последние годы определённые успехи достигнуты в применении к решению этих вопросов имитационных динамических моделей продукционного процесса [2]. Анализу влияния на урожайность яровой пшеницы (*triticum aestivum* L.) режимов орошения на фоне разных доз минерального питания посвящена работа [3], которая выполнена с использованием известных динамических моделей, таких как CERES (1986 г.), EPIC (2002 г.) и WOFOST (1989 г.). Полученные результаты свидетельствуют о перспективности метода имитационного моделирования для обоснования норм и сроков поливов.

Данная работа посвящена определению оптимальной стратегии орошения сельскохозяйственных посевов в аридных регионах России. Для этой цели использована система автоматизации компьютерного эксперимента AGROTOOL, v. 4 [4], позволяющая выполнять подготовку данных, многократный

расчёт и анализ получаемых результатов для произвольной внешней модели в пакетном режиме. Интеллектуальным ядром системы является модель продукционного процесса, позволяющая анализировать влияние на динамику формирования урожая как неконтролируемых внешних условий (погода), так и агротехнических и мелиоративных мероприятий [5]. Как показали многочисленные исследования, модель обеспечивает высокую точность расчёта динамики влагозапасов в почве под посевами различных сельскохозяйственных культур, что достигается включением в неё специальной процедуры определения реальных значений транспирации и почвенного испарения [6].

Методика. В основу исследования положена система поливариантного расчёта, обеспечивающая возможность планирования и реализации факторных экспериментов с динамическими моделями [7]. Базовыми понятиями, которыми оперирует система, являются «Проект», «Сценарий» и «Вариант фактора». Проект – это описание конкретного эксперимента, который предполагается осуществить. Он в свою очередь состоит из нескольких сценариев, каждый из которых соответствует одному из будущих прогонов модели и представляет набор контрольных директив, определяющих, какие варианты факторов (почва, культура, погода, стратегия управления и т. д.) будут использованы в качестве входных данных для соответствующего варианта расчёта.

Планирование компьютерного эксперимента в рамках данной системы состоит из двух этапов: формирование всех интересующих в настоящий момент уровней факторов (каждый из которых может состоять из нескольких наборов уникальных данных) и объединение их в структуру «проект – сценарии». Проект, созданный как набор сценариев, может быть «просчитан» в любой момент времени. Расчёт проекта, то есть непосредственное про-

ведение компьютерного эксперимента, сводится к последовательному запуску соответствующей модели путём вызова главной функции специализированного адаптера с набором входных данных, отвечающих текущему сценарию, и записи полученных результатов во временное хранилище. После полного расчёта проекта весь набор полученных результатов может быть проанализирован с помощью встроенных в систему средств статистической обработки данных.

Рассмотрим формальную постановку решаемой задачи оптимизации. Программно реализованная модель производственного процесса формально может быть записана в следующем виде:

$$x(k+1) = f[x(k), w(k), u(k), k];$$

$$x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(k)$ – вектор состояния модели; $w(k)$ – вектор неконтролируемых внешних воздействий (суточные погодные данные); $u(k)$ – управление; k – временной (суточный) шаг модели; f – эволюционный оператор, описывающий изменение характеристик состояния почвенно-растительной системы во времени.

В качестве аргумента управления в данном случае выступает режим орошения. При каждом конкретном значении шага k аргумент $u(k)$ может быть равным или нулю, или нормой полива. Следуя традиционной технологии орошения, будем определять стратегию управления в виде:

$$u(k) = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta(k) > W_{\min}, \\ W_{\max} - \theta(k) & \text{при } \theta(k) \leq W_{\min}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\theta(k)$ – текущая влажность расчётного слоя почвы; W_{\min} – предположительная влажность; $W_{\max} - \theta(k)$ – поливная норма. Для определения оптимальной стратегии управления введём две безразмерные величины u_1 и u_2 как доли наименьшей влагёмкости W_{fc} :

$$W_{\min} = u_1 W_{fc}, \quad W_{\max} = u_2 W_{fc}. \quad (3)$$

Очевидно, что должны выполняться неравенства:

$$u_1 < 1, \quad u_1 < u_2. \quad (4)$$

Иначе говоря, полив должен проводиться в момент достижения влажности расчётного слоя почвы

предположительного значения, а его норма должна обеспечивать значение почвенной влаги, определяемое величиной W_{\max} . При этом коэффициент u_2 может быть либо больше, либо меньше единицы.

Задача оптимизации заключается в нахождении такой программы полива в течение вегетационного сезона $u_{\text{opt}}(k)$, которая доставляет максимум функционалу цели J , записываемому в виде:

$$J = c_Y Y - c_W \sum_{k=0}^N u(k) - c_a \sum_{k=0}^N 1(x) - [u(k)], \quad (5)$$

где Y – урожай; c_Y – цена выращиваемого хозяйственного продукта; c_W – цена воды; k – номер дня, отсчитываемый с начала вегетационного сезона; N – длительность вегетационного сезона; $u(k)$ – интенсивность полива в данный день; $1(x)$ – единичная функция Хевисайда (равная единице при положительном аргументе и нулю – при отрицательном); c_a – накладные расходы по осуществлению разового полива (фиксированные доплаты).

Легко заметить, что принятие решения о проведении полива в конкретный день сразу ведёт к уменьшению возможной выгоды на величину стоимости затраченной воды и накладных расходов (но зато в перспективе может способствовать увеличению конечного урожая Y). Условие односторонности управления формулируется в форме ограничения $u(k) \geq 0$. В свою очередь входящая в функционал цели величина хозяйственного урожая определяется как функция от конечного состояния агроэкосистемы, то есть:

$$Y = Y[x(N)]. \quad (6)$$

Таким образом, поиск оптимальной стратегии орошения сводится к нахождению наилучших значений параметров u_1 , u_2 . Иначе говоря, задача сводится к алгебраической оптимизации. Для её решения мы воспользовались системой поливариантного расчёта и автоматизации компьютерного эксперимента с моделями агроэкосистем.

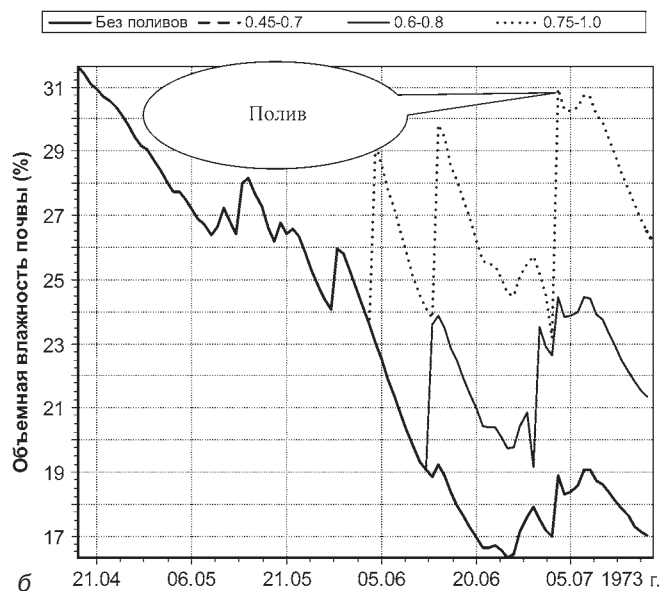
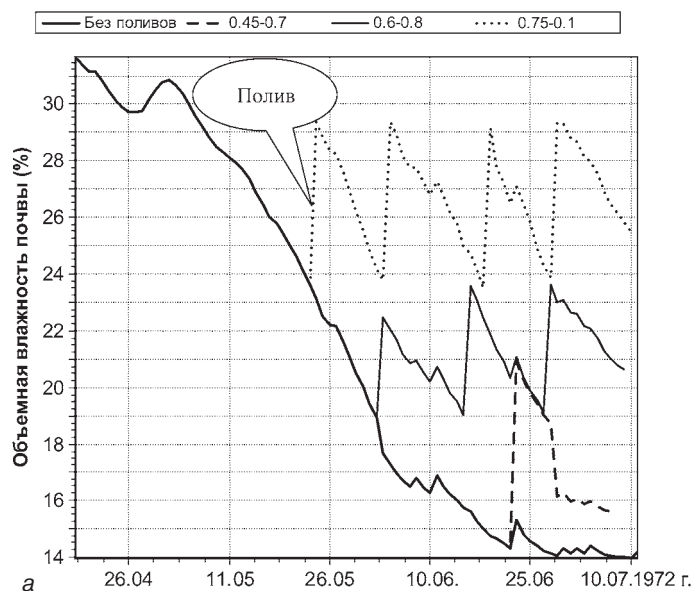
Реализация. Для иллюстрации возможностей метода была выбрана задача построения оптимальной

стратегии назначения сроков и норм полива для варианта возделывания яровой пшеницы сорта Саратовская 29 в условиях Саратовской области. Для численного моделирования результатов использованы данные полевого эксперимента на опытных полях НИИСХ Ю.-В. [8]. Доступная информация содержит сведения о гидрофизических характеристиках почвы, особенностях производственного процесса, а также о суточных погодных данных, сроках наступления фенофаз, значениях влагозапасов в почве и урожае зерна за 12 лет (1972 – 1979 и 1987 – 1990 гг.).

Множество альтернативных технологий орошения задавалось в виде сетки значений u_{\min} , u_{\max} с шагом 0,05, где u_{\min} варьировалась в пределах от 0,4 до 0,95, а u_{\max} – от 0,7 до 1,2. После исключения вырожденных вариантов, проект вычислительного эксперимента состоял из 891 сценария, полный расчёт которых в автоматическом режиме занимал около трёх с половиной часов. Базовые значения экономических параметров, входящих в выражение для функционала цели (5), составляли: $c_Y = 520$ руб/т, $c_W = 0,5$ руб/м³, $c_a = 500$ руб/га.

Результаты и обсуждение. Чувствительность модели к выбранной технологии орошения в одном из сезонов вегетации показана на рисунке. На графиках представлены кривые динамики почвенных влагозапасов для четырёх альтернативных стратегий автоматического орошения в засушливый 1972 г. (а) и сравнительно влажный 1973 г. (б). Ведомость результатов для этих вариантов расчёта приведена в таблице.

Анализ данных таблицы подтверждает очевидное: применение той или иной стратегии автоматического полива оказывается экономически выгодным для засушливых сезонов, когда погодные условия создают значительный водный стресс. И наоборот: орошение во влажные годы незначительно увеличивает урожай, а экономическая эффективность при этом уменьшается.



Динамика влажности слоя почвы 0–100 см при различных вариантах автоматического орошения для засушливого (а) и влажного (б) года

Отсюда можно сделать предположение: оптимальная (в среднем) стратегия орошения должна характеризоваться достаточно низким (близким к влажности завядания) значением величины u_{min} . При этом «триггер» включения полива должен срабатывать только по достижении критического уровня влагообеспеченности, который может привести к значительному снижению конечной продуктивности. В условиях же умеренного стресса агроэкосистема будет ожидать «естественного» увлажнения за счёт осадков, экономя таким образом затраты на поливную воду.

Это предположение подтверждается анализом полного факторного эксперимента, схема которого описана выше. Он показывает, что максимальная (в среднем) величина урожая, равная 3,74 т/га, наблюдается при выборе автоматической технологии орошения, характеризующейся парой значений $u_{min} = 0,85$, $u_{max} = 0,9$. Однако пик максимума целевой функции (5) оказывается очень пологим. Почти для половины всех исследуемых стратегий, описываемых точками сетки $[u_{min}, u_{max}]$, ожидаемый в среднем урожай оказывается больше 3,7 т/га. Иными словами, в отношении продуктивности система оказыва-

ется практически нечувствительной к вариациям технологии орошения в очень широком диапазоне её характеристик. Существенное снижение урожайности наблюдается лишь при малых значениях u_{min} (0,45...0,5).

Вернёмся к исходному критерию успешности хозяйствования – доход от реализации продукции минус затраты на орошение. (Естественно, в данном случае нельзя рассуждать в категории суммарной прибыли, так как мы пренебрегаем всеми остальными расходами.) Тогда оказывается, что наилучшей стратегией для исследуемого региона и выбранных экономических параметров оказывается стратегия орошения, описываемая парой значений $u_{min} = 0,55$, $u_{max} = 1,1$. Иными словами: действительно, наиболее выгодной с экономической точки зрения оказывается «отложенная» стратегия, при которой по-

лив следует проводить редко, но интенсивно. При этом негативный эффект от возможного переувлажнения компенсируется тем, что поливы «с запасом» позволяют уменьшить их число за сезон, то есть сэкономить на накладных расходах. Наконец, следует заметить, что пик максимума для целевой функции от параметров технологии оказывается менее гладким, чем для урожайности. Согласно проведённым расчётам, использование оптимальной в экономическом смысле стратегии по сравнению со стратегией, направленной на максимизацию урожая, может позволить сэкономить в среднем за сезон до 1300 руб. с каждого гектара посева.

Заключение. Некоторые положения и результаты использования изложенной методики могут оказаться спорными с точки зрения взыскательного критика. Так, вы-

Влияние стратегии орошения на результат производственного процесса

Технология $[u_{min}; u_{max}]$	1972 г.				1973 г.			
	Урожай, т/га	Поливная норма, м³/га	Число поливов	Прибыль, руб/га	Урожай, т/га	Поливная норма, м³/га	Число поливов	Прибыль, руб/га
Без поливов	1,51	0	0	0	3,4	0	0	0
[0,45; 0,7]	2,09	806,9	1	2100	3,4	0	0	0
[0,6; 0,8]	2,9	1970,6	3	4734	3,58	1294,4	2	-674
[0,75; 1]	2,98	3320	4	3939	3,6	2540	3	-1717

бранный класс функций (3), в котором разыскивается закон управления, носит формальный характер и не учитывает все соображения о желаемой влагообеспеченности сельскохозяйственных посевов. Действительно, согласно этому закону, нормы и сроки полива определяются исключительно уровнем влажности почвы и не зависят от фазы развития растения. Между тем известен факт критических периодов в его жизни, то есть таких этапов жизненного цикла, когда водный стресс оказывает максимальное влияние на темпы роста и развития. Естественно предполагать поэтому, что более реалистичный закон оптимального управления должен иметь нестационарный характер: в критические фазы развития (например, перед цветением) допустимый уровень водного стресса u_{\min} должен повышаться, в то время как на завершающих стадиях, когда растение уже сравнительно мало подвержено негативному влиянию засухи, уровень u_{\min} можно значительно понизить. Однако для построения нестационарной схемы орошения необходимо прежде всего иметь в качестве инструмента исследования модель такого уровня точности, в которой находили бы адекватное отражение все упомянутые экофизиологические аспекты реакции растения на условия увлажнения.

С учётом изложенного приходится признать, что в настоящее время комплексные математические модели уровня агроэкосистемы лишь приближаются к желаемому уровню детальности и точности описания. Это заставляет с определённой долей осторожности относиться к количественным оценкам и конкретным значениям параметров оптимального алгоритма, полученным в настоящей статье. Однако качественные выводы кажутся нам вполне здоровыми, а методика исследования сравнительной эффективности альтернативных агротехнологий, основанная на использовании разработанной системы поливариантного анализа

модели агроэкосистемы, – жизне-способной. Во всяком случае, нам представляется, что этот метод является важным шагом к пониманию новой роли математической модели продукционного процесса – от чисто академической, исследовательской абстракции к «электронному агроному», приносящему конкретную пользу в реальной практике сельскохозяйственного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по орошению / Под ред. Б.Б. Шумакова. – М.: Агропромиздат, 1990. – 415 с.
2. Головатый В.Г., Добрачëв Ю.П., Юрченко И.Ф. Модели управления продуктивностью мелиорируемых агроценозов. – М.: ВНИИГиМ, 2001. – 166 с.
3. Montazar A., Mohsem M. Optimizing Wheat Water Productivity as Affected by Irrigation and Fertilizer-nitrogen Regimes in Arid Environment // Journ of Agric. Sci. – 2011. – Vol. 2. – No. 3.
4. Топаж А.Г., Полуэктов Р.А., Кобылянский С.Г. Система поливариантных расчётов динамической модели продукционного процесса в задачах точного земледелия // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2006. – № 6. – С. 58 – 61.
5. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2006. – 390 с.
6. Полуэктов Р.А., Кумаков В.А., Василенко Г.В. Моделирование транспирации посевов сельскохозяйственных растений // Физиология растений. – 1997. – № 1 – 2. – С. 68 – 72.
7. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Кобылянский С.Г., Полуэктов М.А. Автоматизация компьютерного эксперимента с математическими моделями // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 2. – С. 61 – 63.
8. Полуэктов Р.А., Кумаков В.А., Захарова Е.Т., Финтушал С.М. Динамическая модель продукционного процесса яровой пшеницы: Учёт влияния водного стресса на рост и развитие растений // Сельскохозяйственная биология. – 2002. – № 1. – С. 44 – 53.

МЕЛИОРАЦИЯ "ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО"

Уважаемые читатели!

Если вы не успели оформить подписку на первое полугодие 2012 года, то можете это сделать в редакции журнала, перечислив на её счёт 1410 руб. за один комплект (включая затраты на пересылку).

Не забудьте подписаться на второе полугодие 2012 года.

Подписку можно оформить в редакции

АНО «Редакция журнала «Мелиорация и водное хозяйство»
127550, Москва, ул. Прянишникова, 19
Реквизиты редакции:
Сбербанк России ОАО, г. Москва,
Р/с 40703810938070101120
К/с 30101810400000000225
БИК 044525225
ИНН 7708043734
КПП 771301001

Тел./факс (499)976-03-12

E-Mail: mivh@mail.ru

Просьба четко указывать свой адрес в платежном документе!

МЕЛИОРАЦИЯ "ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО"

2 2012

