

УДК 631.671:57.087

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ХОДА КОЭФФИЦИЕНТА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР КАК ЗАДАЧА НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

А. Г. ЗАМАРАЕВ, А. П. БОЙКО, Ш. Г. МАМЕДОВ, Г. В. ЧАПОВСКАЯ

(Кафедра растениеводства)

Предложен новый подход к задаче определения динамики биологических коэффициентов водопотребления сельскохозяйственных культур для Нечерноземной зоны. Его использование позволяет заблаговременно вычислять биологические коэффициенты водопотребления сельскохозяйственных культур и соответствующим образом планировать проведение агротехнических приемов.

Центральной проблемой орошающего земледелия является расчет оптимальных оросительных норм. Она приобретает особую актуальность в связи с ухудшающейся экологической обстановкой, вызываемой в первую очередь засолением почв и заболачиванием территории.

Оросительные нормы поливной воды, естественно, связывают с суммарным испарением, так как полив должен компенсировать потерю влаги в почве на испарение.

В настоящее время одним из достаточно обоснованных методов расчета суммарного испарения с сельскохозяйственных полей является метод биологических кривых [5]. В этом случае суммарное испарение E определяется из уравнения

$$E = E_0 K_b \quad (1)$$

где E_0 — испаряемость, мм; K_b — биологический коэффициент водопотребления. Величина E_0 — это испарение при достаточном увлажнении почвы, она зависит от таких метеорологических элементов, как температура, дефицит влажности

воздуха, скорость ветра [3, 5, 7]. Значение E_0 изменяется по годам и имеет региональный характер. Коэффициент водопотребления K_b связывает испарение с конкретной сельскохозяйственной культурой. Его значение отражает потребность культуры во влаге в условиях достаточного увлажнения в онтогенезе, оно не должно изменяться по годам и зависит от особенностей территории (естественно, для культуры одного сорта) [5]. Но поскольку испаряемость E_0 — величина, в общем-то, условная и на практике, особенно при недостаточном увлажнении, определяется не всегда корректно [1, 7], коэффициент K_b будет иметь вариации в зависимости от года и территории.

В настоящей работе освещается подход к исследованию динамики K_b , основанный на аналитическом представлении его временного хода. Оценку параметров последнего предлагается производить на основе решения оптимизационной задачи нелинейного программирования. Конкретные расчеты для

примера проведены на основании данных, полученных в опыте с озимой пшеницей сорта Мироновская 808 в училище «Михайловское» Тимирязевской академии.

Из формулы (1) имеем

$$K_b = E/E_0. \quad (2)$$

Значение Е определяем из уравнения водного баланса

$$E = W_n - W_k + R, \quad (3)$$

где W_n , W_k — начальная и конечная влажность метрового слоя почвы, мм; R — осадки, впитавшиеся за расчетный период, мм. Заметим, что согласно многолетним наблюдениям вклад других слагаемых уравнения водного баланса [6] в вегетационный период пренебрежимо мал. В расчетах использовались данные о суммарном испарении, получаемые ежедекадно с помощью весового монолита ГГИ-500-100.

Испаряемость E_0 рассчитывали по методу Н. В. Данильченко [3], т. е.

$$E_0 = K_t d f(V), \quad (4)$$

где K_t — энергетический фактор испарения, мм/мб; d — дефицит влажности воздуха, мб, $f(V)$ — ветровая функция.

Энергетический фактор определяется по формуле

$$K_t = \frac{0,0061(25+t)^2}{e_a}, \quad (5)$$

t — средняя температура воздуха за расчетный временной интервал, °С; e_a — максимальная упругость насыщенного пара при данной температуре.

Ветровая функция получается из зависимости

$$f(V) = 0,64(1 + 0,19V_2), \quad (6)$$

где V_2 — средняя скорость ветра на высоте 2 м от поверхности земли, м/с (полагалось $V_2 =$

$$= 0,75V_{\text{флюгер}}).$$

Расчет K_b непосредственно по формуле (2) имеет как свои достоинства, так и недостатки. K_b , определенные по данным за конкретный год, дают истинную картину динамики водопотребления в исследуемом году, что вряд ли достижимо при использовании этих же значений K_b на следующий год. Выходом из такого положения является их осреднение, обработка, сопоставления K_b с влажностью почвы или с метеорологическими данными, т. е. получение «сглаженных», «теоретических» коэффициентов, уже не учитывающих особых особенностей года.

К недостаткам расчета K_b по формуле (2) относится их большая чувствительность к ошибкам в определении испарения или слагаемых уравнения водного баланса (3). К тому же слагаемые этого уравнения имеют локальную интерпретацию, в то время как E_0 допускает региональную трактовку. В этом тоже кроется немалое противоречие формулы (2). В результате значения K_b изменяются во времени, «рыскают».

Благодаря накоплению достаточного материала по временному ходу значений K_b для многих сельскохозяйственных культур можно установить вид кривых K_b как функций времени.

Пусть

$$K_b = K_b(t, a_1, \dots, a_n), \quad (7)$$

где t — время, a_1, \dots, a_n — коэффициенты (параметры) аналитического представления $K_b(t)$.

Теперь принадлежность K_b к тому или иному году будет определяться численными значениями параметров a_1, \dots, a_n . Следует все же отметить, что заданный «средний» вид кривой может оказаться малоподходящим для конкретного го-

да. Но использование известного характера временных изменений K_b оправдывается во многом меньшей чувствительностью K_b к разного рода ошибкам измерений и, главное, следующими обстоятельствами.

Во-первых, по представлению (7) коэффициент водопотребления можно определить на любой момент времени (сутки), а интегрируя по времени, можно получить (суммарное) значение K_b за интересующий нас интервал времени (за декаду, межфазный период и т. д.). Согласно излагаемой ниже методике, параметры a_1, \dots, a_n , представленные в (7), могут определяться по составляющим водного баланса почвы или по измеренным значениям E через любой промежуток времени (раз в декаду, раз в месяц). Возможны пропуски (выбраковки) с данными измерений. Другими словами, методика становится гибкой. Естественно все же, что чем больше будет экспериментального материала, тем точнее можно оценить параметры a_1, \dots, a_n .

Во-вторых, предлагаемая нами методика нахождения параметров биологических кривых водопотребления позволяет подобрать в некотором смысле наилучшую функцию, аппроксимирующую временной ход K_b данного года, т. е. возможно уточнение нашего первоначального представления об аналитическом выражении (7).

И, наконец, исследование межгодового хода значений K_b можно будет свести к определению параметров a_1, \dots, a_n , их устойчивости в зависимости от года, культуры, сроков наступления фаз развития, биометрических характеристик посевов и т. д. Возможно, что для некоторых групп сельскохозяйственных культур более оптимальным

окажется «свой» вид аналитического представления (7).

Кроме того, что особенно важно, представление K_b как функции времени может служить отправной точкой к оперативному вычислению K_b на некоторое время вперед в условиях данного года.

Итак, пусть

$$K_b = K_b(i, \bar{A}) = i_i(\bar{A}) = f_i, \quad (8)$$

где i — порядковый номер суток от некоторой даты, принятой за начало отчета; \bar{A} — вектор неопределенных параметров функциональной зависимости K_b конкретной сельскохозяйственной культуры от времени, $\bar{A} = \{a_1, \dots, a_n\}$.

Пусть R_k, E_{ok}, E_k — значения соответствующих суточных величин на порядковую дату с номером k ; W_0, W_m — влажность метрового слоя почвы на начало расчета ($k=0$) и на дату с порядковым номером m . Тогда можем записать

$$\sum_{k=0}^m E_k = \sum_{k=0}^m E_{ok} f_k, \quad (9)$$

или с учетом (3)

$$W_0 - W_m + \sum_{k=0}^m R_k = \sum_{k=0}^m E_{ok} f_k. \quad (10)$$

Составим функционал

$$\Psi_1 = \sum_{i=1}^{n-1} (W_0 - W_i + \sum_{k=0}^i R_k - \sum_{k=0}^i f_k E_{ok})^2, \quad (11)$$

где i, n — порядковый номер и общее число определений влажности почвы временного интервала, для которого находим $K_b(t)$; 1 — порядковая дата i -го номера определения влажности почвы.

Теперь параметры a_1, \dots, a_n можно определить как числа, минимизирующие функционал Ψ .

Кажущимся недостатком функционала Ψ является то, что при любом новом i суммирование по k опять начинается с нуля. Более экономичным кажется функционал

$$\begin{aligned}\Psi_1 = \sum_{i=1}^{N-1} (W_i - W_L + \sum_{k=1}^L R_k - \\ - \sum_{k=1}^L f_k E_{ok})^2, \quad (12)\end{aligned}$$

где L , 1 — соответственно порядковые даты i -го и $(i-1)$ -го определений влажности почвы.

Численные эксперименты показали бесперспективность использования функционала Ψ_1 для определения параметров a_1, \dots, a_n . И вот почему.

Запишем (10) в следующем виде:

$$\begin{aligned}(W_0^{изм} + \varepsilon_0) - (W_m^{изм} + \varepsilon_m) + \sum_{k=0}^m R_m = \\ = \sum_{k=0}^m E_{ok} f_k, \quad (13)\end{aligned}$$

где $\varepsilon_0, \varepsilon_m$ — ошибки в определении влажности, которыми вряд ли стоит пренебрегать [2], изм — означает, что влажность определена экспериментально.

Функционалы Ψ и Ψ_1 теперь принимают вид

$$\Psi = \sum_{i=1}^{N-1} (\varepsilon_0 - \varepsilon_L)^2, \quad \Psi_1 = \sum_{i=1}^{N-1} (\varepsilon_1 - \varepsilon_L)^2. \quad (14)$$

В первом случае сопоставляются ошибки ε_L с одним числом ε_0 , во втором — ошибки двух последовательных измерений влажности почвы. Для функционала (11) каждое слагаемое (без степени 2) ряда по i дает число $(\varepsilon_0 - \varepsilon_L)$, в то время как для функционала (12) — $(\varepsilon_1 - \varepsilon_L)$. Интерпретируя ε_0 как систематическую ошибку измерений, неустранимую ошибку прибора, име-

ем оценки

$$(\varepsilon_0 - \varepsilon_L)^2 \rightarrow \varepsilon^2, \quad (\varepsilon_1 - \varepsilon_L)^2 = [(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) - (\varepsilon_L - \varepsilon_0)]^2 \rightarrow (2\varepsilon)^2,$$

где ε — случайная составляющая ошибки измерения. Определяя a_1, \dots, a_n как числа, дающие минимум функционалам Ψ или Ψ_1 , ошибки в определении влажности почвы мы невольно переносим на численные значения параметров a_1, \dots, a_n . Естественно, что во втором случае, при минимализации функционала Ψ_1 , ошибки в параметрах a_1, \dots, a_n будут больше.

Записывая равенство (13), мы молчаливо предполагаем, что заданный нами вид аналитической зависимости (7) идеален. На самом деле это не так. Подбирая из аналитических зависимостей $K_b(t)$ ту, для которой ошибки $|\varepsilon_1 - \varepsilon_0|$ или некоторая функция от них [8] будут наименьшими, мы в принципе можем найти подходящую зависимость $K_b(t)$ или для вида сельскохозяйственной культуры, или даже для конкретного года.

При наличии данных об испарении можно построить соответствующие функционалы и на основании равенства (9).

Анализ имеющихся данных о временном ходе коэффициента K_b для разных сельскохозяйственных культур позволяет в качестве аппроксимирующей функции использовать выражение вида

$$f = at^b \exp(ct), \quad (15)$$

где a, b, c — параметры, t — время, порядковая дата. Для биологических коэффициентов K_b $a > 0$, $b \geq 0$, $c < 0$. При этих условиях f — одновершинная кривая с восходящей и нисходящей ветвями типа S-образных кривых.

Пусть t_0 — точка максимума функции

Таблица 1

Влажность почвы в слое 0—100 см (W , мм), испаряемость (E_0 , мм) и выпавшие осадки (R , мм) за интервал между двумя сроками измерения влажности почвы (учхоз «Михайловское», 1985—1989 гг.)

Показатель	1985 г.	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.
<i>Интервал 0</i>					
Дата	24.04	24.04	29.04	25.04	31.03
W	352,50	366,71	363,40	361,80	368,30
E_0	—	—	—	—	—
R	—	—	—	—	—
<i>Интервал 1</i>					
Дата	4.05	6.05	12.05	4.05	13.04
W	354,00	348,50	351,9	343,20	366,8
E_0	18,77	48,89	47,11	20,28	15,62
R	13,70	3,80	24,30	3,00	12,40
<i>Интервал 2</i>					
Дата	11.05	15.05	22.05	10.05	21.04
W	345,00	339,20	338,50	347,6	361,80
E_0	20,20	35,31	34,91	12,89	6,97
R	21,50	2,00	5,80	19,10	17,80
<i>Интервал 3</i>					
Дата	15.05	27.05	3.06	16.05	3.05
W	335,40	317,70	342,70	324,3	358,30
E_0	16,85	43,36	23,11	21,23	35,37
R	2,70	26,20	46,50	4,30	11,00
<i>Интервал 4</i>					
Дата	20.05	6.06	15.06	30.05	10.05
W	327,70	306,20	320,0	287,0	351,80
E_0	16,38	47,50	44,17	46,80	9,62
R	0,0	24,51	9,10	8,10	1,10
<i>Интервал 5</i>					
Дата	30.05	16.06	24.06	10.06	22.05
W	326,90	301,80	345,10	264,0	310,80
E_0	27,75	35,56	23,18	38,95	38,45
R	21,24	21,20	45,50	6,60	1,30
<i>Интервал 6</i>					
Дата	10.06	26.06	6.07	20.06	31.05
W	315,10	326,10	332,70	274,70	299,70
E_0	35,09	34,57	36,64	15,06	24,82
R	44,00	60,60	37,80	47,90	1,72
<i>Интервал 7</i>					
Дата	20.06	7.07	16.07	30.06	9.06
W	327,20	300,20	325,60	247,30	266,60
E_0	17,00	35,23	27,25	27,69	28,37
R	39,30	13,20	34,50	3,10	5,20
<i>Интервал 8</i>					
Дата	30.06	16.07	27.07	11.07	20.06
W	311,0	342,70	324,30	238,80	267,90
E_0	31,88	23,30	31,61	25,80	21,28
R	9,40	44,60	8,50	22,20	22,70
<i>Интервал 9</i>					
Дата	10.07	29.07	7.08	20.07	—
W	318,20	321,40	324,70	275,10	—

Показатель	1985 г.	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.
E_0	17,52	31,19	25,74	23,53	—
R	32,60	20,80	12,50	63,60	—
<i>Интервал 10</i>					
Дата	18.07	—	19.08	25.07	—
W	323,50	—	335,90	294,60	—
E_0	18,14	—	28,89	18,60	—
R	20,90	—	16,40	8,90	—
<i>Интервал 11</i>					
Дата	31.07	—	—	—	—
W	319,20	—	—	—	—
E_0	25,92	—	—	—	—
R	26,70	—	—	—	—
<i>Интервал 12</i>					
Дата	9.08	—	—	—	—
W	290,70	—	—	—	—
E_0	16,96	—	—	—	—
R	12,30	—	—	—	—

$$f(f(t_0) = f_{\max} \text{ и } \frac{df}{dt}|_{t=t_0} = 0).$$

Тогда можем (15) записать в виде

$$f(t) = f_{\max} \left(\frac{t+t_1}{t_0+t_1} \right)^b \exp \left[-b \left(\frac{t-t_0}{t_0+t_1} \right) \right]. \quad (16)$$

В функции (16) дополнительно введен параметр t_1 размерности времени, обеспечивающий выполнение условия $f(t_{\text{нач}} + t_1) > 0$, где $t_{\text{нач}}$ — первая порядковая дата расчета f (или, что то же самое, K_b).

Искомыми параметрами функции (16) выступают f_{\max} , b , t_0 и t_1 .

Кривую (16) можно также представить в виде

$$f = f_* + (f_{\max} - f_*) \times \\ \times \left(\frac{t-t_{\text{нач}}}{t_0-t_{\text{нач}}} \right)^b \exp \left(\frac{t-t_0}{t_0-t_{\text{нач}}} \right), \quad (17)$$

где $f_* = f|_{t=t_{\text{нач}}}$.

В этой функции также 4 параметра: f_* , f_{\max} , b и t_0 .

Если же исходный бинал взять в виде

$$f = at^b \exp(ct^d) \quad (18)$$

и провести необходимые преобразования, то получим

$$f = f_{\max} \Psi^b \exp \left[-\frac{b}{a} (\Psi^d - 1) \right], \quad (19)$$

где

$$\Psi = \frac{t+t_1}{t_0+t_1}.$$

Здесь уже 5 неизвестных параметров: f_* , f_{\max} , d , t_0 и t_1 . Но благодаря дополнительному параметру d функция (19) более гибкая, чем функции (16) и (17).

Проиллюстрируем эффективность различных методик вычисления K_b для озимой пшеницы на опытном поле кафедры растениеводства в учхозе «Михайловское» по данным за 1985—1989 гг. За эти годы имелась вся информация

Таблица 2

Фенологические наблюдения в посевах озимой пшеницы в 1985—1989 гг.

Год	Возобновление вегетации	Выход в трубку	Колосование	Цветение	Молочная спелость	Восковая спелость	Полная спелость
1985	23.04	17.05	15.06	23.06	15.07	30.07	7.08
1986	20.04	15.05	6.06	10.06	25.06	14.07	21.07
1987	30.04	19.05	19.06	23.06	14.07	1.08	7.08
1988	8.04	10.05	8.06	11.06	28.06	11.07	18.07
1989	23.03	30.04	4.06	7.06	21.06	77.07	13.07

(ежедневные данные), необходимая для вычисления испаряемости: осадки за сутки, влажность метрового слоя почвы в календарные даты, а также декадные значения испарения за 1987 г. В табл. 1 приведены данные о влажности метрового слоя почвы, рассчитанные по формуле (4) значения испаряемости и количество выпавших осадков за время между двумя сроками измерения влажности почвы, в табл. 2 — результаты фенологических наблюдений, в табл. 3 — значения коэффициентов водопо-

требления, рассчитанные по формуле

$$K_{6W} = \frac{W_h - W_k + R}{E_0}, \quad (20)$$

полученной из формулы (2) с учетом выражения для E из (3). Коэффициенты K_{6W} характеризуют период времени между двумя датами определения влажности почвы. Значения K_{61} получены по формуле (17), параметры которой (f^* , f_{max} , b и t_0) определялись как числа, минимизирующие функционал Ψ . Поскольку значения f из (17) су-

Таблица 3

Значения K_{6W} , рассчитанные по формуле (2) и аппроксимационной формуле (соответственно K_{6W} и K_{61}), для интервалов наблюдений за влажностью почвы под озимой пшеницей в 1985—1989 гг.

Показатель	Временной интервал											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1985 г.												
K_{6W}	0,65	1,51	0,73	0,47	0,80	1,59	1,60	1,17	1,45	0,86	1,20	2,40
K_{61}	0,83	0,89	0,94	0,99	1,11	1,32	1,45	1,43	1,39	1,34	1,27	1,24
1986 г.												
K_{6W}	0,45	0,32	1,10	0,76	0,72	1,05	1,11	0,09	1,35			
K_{61}	0,48	0,57	0,68	0,85	0,97	0,95	0,92	0,88	0,84			
1987 г.												
K_{6W}	0,76	0,55	1,83	0,72	0,88	1,37	1,49	0,31	0,47	0,18		
K_{61}	0,68	0,91	1,18	1,13	1,04	0,95	0,86	0,80	0,75	0,71		
1988 г.												
K_{6W}	1,07	1,14	1,30	0,97	0,76	2,47	1,21	1,19	1,16	-0,57		
K_{61}	1,04	1,10	1,16	1,17	1,15	1,13	1,10	1,08	1,05	1,04		
1989 г.												
K_{6W}	0,89	3,27	0,41	0,79	1,10	1,14	1,35	0,78				
K_{61}	0,98	0,99	0,99	1,00	1,04	1,08	1,15	1,30				

точные, при расчете K_{61} было произведено суммирование (интегрирование) на необходимое число дней для всех временных интервалов.

В табл. 4 даны значения ошибок $\varepsilon_m - \varepsilon_0$ с их знаком, а также приведены средние квадратические отклонения

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\varepsilon_i - \varepsilon_0)^2}{N-1}}.$$

Анализ данных табл. 3 показывает, что значения коэффициентов K_6 изменяются от срока к сроку плавно и имеют максимум в фазу колошения или около нее. Исключением был 1989 год, когда значения K_{61} и K_{6W} возрастили на протяжении всего времени их определения.

Коэффициенты K_{6W} , хотя и отражают общую тенденцию временного хода коэффициентов водопотребления, но изменяются неплавно. Следует подчеркнуть, что наблюдающиеся скачки в большую или меньшую стороны в их значениях хорошо согласуются с данными об ошибках $\varepsilon_L - \varepsilon_0$ (табл. 4). Например, для второго временного интервала 1985 г. $K_{6W} = 1,51$. Слева и справа этого числа стоят значения K_{6W} меньше единицы. Из табл. 4 видно, что в это время ошибка определения влажности почвы была довольно большой и имела к тому же знак, обратный ошибке определения влажности почвы в предыдущий срок. Расчет K_{6W} по формуле (20) ведет к тому, что суммарная ошибка получается равной сумме обеих ошибок (с учетом их знаков). Так, числа 4,07 и 8,47 (табл. 4) для 1985 г. следует принимать так, что

по сравнению с ошибкой определения влажности 24 апреля (табл. 1) влажность 4 мая была определена с завышением на 4,07 мм, а 11 мая — с занижением на 8,47 мм. Если теперь обратиться к формуле (20), то увидим, что K_{6W} для второго временного интервала

$$K_{6W2} = \frac{W_h^{изм} - W_k^{изм} + R}{E_0} = \\ = \frac{W_h^{\text{факт}} + 4,07 - (W_k^{\text{факт}} - 8,47) + R}{E_0} = \\ = K_{6W}^{\text{факт}} + \frac{12,52}{E_0} > K_{6W}^{\text{факт}}.$$

Это и показывает число $K_{6W} = 1,51$.

Здесь «изм» обозначает, что влажность почвы измеренная и K_{6W} , вычислен по ней, а «факт» — условно-фактическую влажность почвы.

Резкие колебания в трех последних значениях K_{6W} за 1986 г. (табл. 3) опять-таки связаны со сравнительно большими ошибками в определении влажности почвы

Таблица 4
Значения $\varepsilon_m - \varepsilon_0$ по интервалам наблюдений за влажностью почвы под озимой пшеницей и их средние квадратические отклонения в 1985—1989 гг.

Временной интервал	1985	1986	1987	1988	1989
		$\varepsilon_m - \varepsilon_0$			
1	4,07	1,97	10,66	2,82	-0,42
2	8,47	-8,54	-6,07	3,46	16,70
3	4,94	6,98	11,30	6,65	-1,74
4	-3,82	2,52	-9,85	-2,39	-4,33
5	-12,34	-3,89	-14,49	-18,26	-2,74
6	2,55	0,26	0,43	2,24	0,32
7	7,04	6,39	18,02	4,90	5,96
8	2,27	10,52	5,60	8,60	5,93
9	2,81	4,31	0,87	13,24	—
10	-6,46	—	-10,30	-15,22	—
11	-9,70	—	—	—	—
12	9,09	—	—	—	—
	Средние квадратические отклонения				
—	6,87	5,93	10,20	9,56	6,89

Таблица 5

Декадные значения фактического суммарного испарения (E , мм), испаряемости (E_0 , мм), коэффициентов K_b , рассчитанных по формуле (2) и по аппроксимационной формуле (соответственно K_{6E} и K_{62}) для озимой пшеницы за 1987 г.

Показатель	Май		Июнь			Июль	
	I	III	I	II	III	I	II
E	19,5	28,8	16,6	28,4	22,5	29,6	24,7
E_0	33,2	26,6	25,8	37,4	24,4	32,2	22,6
K_{6E}	0,44	1,08	0,64	0,76	0,88	0,92	1,09
K_{62}	0,88	1,17	1,15	1,07	0,98	0,92	0,83

для этих временных интервалов (табл. 4).

Такая тесная связь разброса значений K_{6W} в табл. 3 с данными табл. 4 в этих и других случаях указывает на то, что определение временного хода K_b с использованием аппроксимационных функций позволяет дополнительно судить о характере ошибок в определении влажности почвы. Поскольку ошибки $\varepsilon_m - \varepsilon_0$ связаны не только с влажностью почвы, но и с ошибками определения доли осадков, впитавшихся в почву, с ошибками аппроксимации временного хода $E_0(t)$, $K_b(te)$, то числа $\varepsilon_m - \varepsilon_0$ следует понимать как приближенные значения ошибок определения влажности почвы.

В табл. 5 приведены декадные значения K_{6E} , рассчитанные из формулы (2) по данным измерения суммарного испарения с пшеничного поля в 1987 г., и значения K_{62} , определенные как и K_{61} (табл. 3), но просуммированные за декаду. Опять предпочтение надо отдать K_{62} . Следует подчеркнуть, что определение влажности почвы для оценки параметров функции $K_b(t)$ — задача технически менее сложная, чем организация и проведение работ по определению суммарного испарения.

Для аппроксимации временного

хода K_b для пшеницы мы использовали функцию (17). Опыт показал, что, например, для картофеля и клевера 1-го года пользования более приемлемой была функция (19). Перспективным может оказаться применение сплайнов в качестве аппроксимации функции [4].

Выводы

1. Предложен новый подход к задаче определения динамики биологических коэффициентов водопотребления сельскохозяйственных культур для Нечерноземной зоны. Он выражается в том, что указанная задача сводится к оптимизационной задаче оценки параметров его аналитического представления.

2. Предложенный метод (или подход) позволяет заблаговременно вычислять биологические коэффициенты водопотребления сельскохозяйственных культур и соответствующим образом планировать проведение агротехнических приемов.

3. Биологические коэффициенты водопотребления, полученные с использованием предложенного метода, дают возможность точнее определять фактическое состояние влажности почвы, испарение и надежнее определять сроки и нормы полива для получения высокого

урожая воздёльываемых культур с учетом соблюдения экологических требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения.—Л.: Гидрометеоиздат, 1985.—
2. Грингоф И. Г., Гридасов В. Ф. Состояние и перспективы измерений влажности почвы на сети станций Госкомгидромета.—В сб.: Проблемы и пути развития методов наблюдения за влагообеспеченностью посевов. / Докл. Всесоюзной конференции, Черкассы, сентябрь 1981 г.—Л.: Гидрометеоиздат, 1983, с. 3—11.—
3. Данильченко Н. В. Методические указания по расчету водопотребления и оросительных норм с.-х. культур в Нечерноземной зоне

РСФСР.—Коломна, 1981.—

4. Завялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. А. Методы сплайн-функций.—М.: Наука, 1980.—
5. Констаннов А. Р., Струнников Э. А. Нормирование орошения, методы, их оценка, пути уточнения. Гидрология и мелиорация, с. 37—44.—
6. Методы расчета водных балансов. Междунар. руководство по исследованиям и практике / Под ред. А. А. Соколова и Т. Г. Чапмена.—Л.: Гидрометеоиздат, 1976.—
7. Режимы влагообеспеченности и условия гидромелиорации степного края / Под ред. В. С. Мезенцева.—М.: Колос, 1974.—
8. Чуев Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузмин В. И. Прогнозирование количественных характеристик процессов.—М.: Радио, 1975.

Статья поступила 20 февраля 1992 г.