

УДК 631.674

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ВНУТРИПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ НА СТОК ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ОРОШЕНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ

И. А. РОМАНОВ

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 04.03.2019)

Для территорий с неустойчивой естественной влагообеспеченностью характерны периоды как с избытком, так и с недостатком почвенной влаги. Избыток влаги приводит к возникновению внутрипочвенного стока, в результате которого питательные элементы вымываются из корнеобитаемой зоны в нижележащие почвенные слои и к грунтовым водам, загрязняя их и обедняя питание растений. В статье приводятся результаты моделирования водного баланса в течение вегетации многолетних трав сенокосного использования, возделываемых на суглинистых почвах, с целью оценки потерь внутрипочвенной влаги на сток в разные по влагообеспеченности годы при разных режимах орошения. Расчеты показали, что повышение предполивного порога с 60 % от наименьшей влагоемкости до 80 % приводит к существенному росту непродуктивных потерь оросительной влаги на сток. Отмечена также высокая вероятность возникновения внутрипочвенного стока и при естественном увлажнении, что делает сток значимым элементом водного баланса почвы.

По итогам расчетов был сделан вывод, что наибольшая экономия поливной воды при предполивном пороге в 80 % от наименьшей влагоемкости достигается при поливной норме, близкой к суточному водопотреблению. Орошение с предполивным порогом в 70 % от наименьшей влагоемкости также желательно выполнять пониженной нормой полива, что способствует экономии оросительной воды. В свою очередь повышение нормы полива при предполивном пороге в 60 % от наименьшей влагоемкости не приводит к существенному росту внутрипочвенного стока. Однако следует учитывать, что следствием уменьшения поливных норм является рост числа поливов, поэтому для максимального повышения эффективности орошения необходима технико-экономическая оптимизация режима поливов.

Ключевые слова: водный баланс, орошение, внутрипочвенный сток, поливная норма, наименьшая влагоемкость.

For areas with unstable natural moisture supply, the periods with both excess and insufficient soil moisture are very typical. Moisture excess results in deep percolation runoff, the nutrients are washed out from the root zone, and water becomes inaccessible to plants. The article analyzes the modeling of water balance over a long-term period using the example of perennial grasses for haying to estimate the amount of deep percolation runoff at different irrigation scheduling. Calculations have shown that the increase of the irrigation threshold from 60% of the field capacity to 80% leads to a significant loss of irrigation moisture as a runoff. There is also a high probability of occurrence of subsurface runoff even with natural moisture, which makes runoff a significant element of the water balance of the soil.

As a result of the analysis of the calculations, it was concluded that irrigation with a pre-irrigation threshold of 80% FC should be performed with the irrigation rate close to the daily water consumption. With water application of 70% FC irrigation threshold, it is recommended to apply a reduced rate, which has a positive effect on the saving of irrigation water. At the same time, the increase in the irrigation rate at a pre-irrigation threshold of 60% of the lowest moisture capacity does not lead to a significant increase in subsurface runoff. However, it should be taken into account that reduction of irrigation rates results in the increase in the number of irrigations, therefore, to maximize the efficiency of irrigation, technical and economic optimization of the irrigation regime is necessary.

Key words: water balance, irrigation, deep percolation, irrigation rate, field capacity.

Введение

Неустойчивые погодные условия, характерные для Республики Беларусь, требуют особого внимания при разработке режимов регулирования влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Наиболее широко распространенным способом искусственного увлажнения растений на территории Беларуси является орошение дождеванием [1].

Режим орошения включает в себя даты, сроки и нормы поливов, которые зависят от орошаемой культуры и почвенно-климатических условий [2]. Для крупных оросительных комплексов наиболее простой и доступный способ управления режимом орошения базируется на результатах водобалансовых расчетов.

Водный баланс почвы включает в себя приходную и расходную части. К основным элементам расходной части водного баланса относятся водопотребление орошаемой культуры и непродуктивные потери почвенной влаги, а к приходным – атмосферные осадки и поливы. Причем обильные атмосферные осадки, вероятность выпадения которых

на территории Беларуси достаточно высока, часто приводят к появлению внутрипочвенного стока – существенного элемента расходной части водного баланса почвы [3].

Внутрипочвенный сток возникает, когда текущие влагозапасы почвы превышают ее водоудерживающую способность, в результате чего появляющаяся гравитационная влага инфильтруется ниже корнеобитаемого слоя, пополняя в водном балансе потери почвенной влаги для растений. Внутрипочвенный сток приводит также к вымыванию питательных веществ из верхних слоев почвы, вследствие чего возрастает потребность в минеральных удобрениях [4].

В Беларуси накоплен достаточно большой опыт в разработке и обосновании режимов орошения. Ранее выполнялась оценка экологически и экономически оптимальных поливных режимов для многих возделываемых культур. Вместе с тем анализ работ А. П. Лихацевича, М. Г. Голченко, В. И. Вихрова и др. белорусских ученых позволяет сделать вывод, что орошение в почвенно-климатических условиях Беларуси является лишь дополнением к естественному увлажнению, причем часто при достаточно высоком суммарном количестве атмосферных осадков за вегетацию [1–3]. В этих условиях поливная вода, поданная на орошаемый участок в периоды дефицита влагозапасов в почве, может впоследствии вызвать дополнительные потери на сток влаги атмосферных осадков, выпадающих в межполивные периоды.

Учет вероятности возникновения внутрипочвенного стока при установлении режимов орошения позволяет нам организовывать поливы таким образом, чтобы снизить непродуктивные потери оросительной влаги на сток и уменьшить вымывание питательных веществ из плодородного слоя почвы.

Основная часть

Для решения поставленной задачи нами выполнено моделирование водного баланса легкосуглинистой почвы в течение вегетационных периодов для орошаемых многолетних бобово-злаковых трав сенокосного использования за 1980–2016 гг. Ежегодные значения внутрипочвенного стока, полученные при предполивных порогах (W_{III}) в 60 %, 70 %, 80 % от НВ и поливных нормах в 10 мм, 20 мм, 30 мм, использовались для оценки их распределения в многолетнем разрезе.

Расчет водного баланса в каждом году начинался с 21 апреля и заканчивался концом активной вегетации (конец сентября). Начальные влагозапасы приняты равными наименьшей влагоемкости, которая для слоя 0–50 см легкосуглинистой почвы составляла 180 мм. Расчетный интервал принят равным одни сутки. Расчеты выполнялись по общеизвестной формуле:

$$W_k = W_n + (P + m) - (\varphi E + C), \quad (1)$$

где W_k – конечные влагозапасы; W_n – начальные влагозапасы, P – осадки; m – поливная норма; φ – коэффициент, учитывающий увлажненность почвы, E – эвапотранспирация культуры, C – внутрипочвенный сток.

Водопотребление многолетних трав определялось по формуле:

$$E = 0,1 K_{почв} K_{tm} \sum t_m, \quad (2)$$

где E – эвапотранспирация культуры; $K_{почв}$ – коэффициент учитывающий теплофизические свойства почвы, для суглинков равен 0,94; K_{tm} – биотермический коэффициент культуры; $\sum t_m$ – сумма максимальных суточных температур за расчетные сутки и за 9 суток, предшествующих дате расчета.

Биотермические коэффициенты для многолетних бобово-злаковых трав сенокосного использования получены в полевом эксперименте [5].

Коэффициент, учитывающий увлажненность почвы, рассчитывался по формуле А. П. Лихацевича [6]:

$$\varphi = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{W_{нв}}{W_n} - 1 \right)^2 \right], \quad (3)$$

где $W_{нв}$ – наименьшая влагоемкость почвы; W_n – влагозапасов расчетном слое почвы на начало суток. Внутрипочвенный сток определялся по формуле, полученной нами [7]:

$$C = (W_n - E_m - W_{нв}) \left(\frac{t}{T} \right)^a + P \left(\frac{t}{T} \right)^b, \quad (4)$$

где C – внутрипочвенный сток; t – продолжительность расчетного интервала (одни сутки); T – количество суток до полного стекания гравитационной влаги из расчетного слоя (для легкосуглинистой почвы составляет четверо суток); a и b – эмпирические коэффициенты, для суглинистых почв равны 0,5 и 2,0, соответственно. В расчетах использовались многолетние данные метеостанции Минск (ВМО 26850) – суточная максимальная температура воздуха и атмосферные осадки.

Обеспеченность по многолетним рядам атмосферных осадков и внутрипочвенного стока определялась по общеизвестной формуле:

$$S = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} 100\%, \quad (5)$$

где m – порядковый номер члена убывающего ряда атмосферных осадков, суммарных за вегетацию; n – число членов ряда.

В результате водобалансовых расчетов, выполненных по многолетнему ряду метеоданных, были получены суммарные значения внутрипочвенного стока за вегетационные сезоны в каждом из 37 лет метеонаблюдений. В таблице 1 приведены суммарные за вегетацию атмосферные осадки и внутрипочвенный сток, а также обеспеченность по осадкам, вычисленная за 37-летний период (1980–2016 гг.).

Таблица 1. Зависимость внутрипочвенного стока от атмосферных осадков при разных режимах влагообеспеченности многолетних трав (расчеты за 1980–2016 гг.)

Обеспеченность по осадкам, %	Атмосферные осадки, мм	Внутрипочвенный сток при разных режимах влагообеспеченности, мм										
		Без орошения	$W_{III} = 0,6НВ$			$W_{III} = 0,7НВ$			$W_{III} = 0,8НВ$			
			Поливная норма, мм									
			10	20	30	10	20	30	10	20	30	
1,9	616,9	195,3	195,3	195,3	195,3	195,3	195,3	195,3	195,3	195,3	195,3	
4,5	548,4	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	143,2	150,4	149,9	169,0
7,2	519,2	172,2	172,2	172,2	172,2	172,2	172,2	172,2	172,2	182,0	191,9	202,2
9,9	516,5	152,1	152,1	152,1	152,1	160,6	169,6	179,3	196,2	206,0	205,3	
12,6	475,6	143,5	152,4	161,5	171,0	169,3	178,1	167,8	186,3	195,8	195,7	
15,2	456,2	90,0	90,0	90,0	90,0	97,8	106,4	115,5	114,4	124,1	143,9	
17,9	442,3	143,4	143,4	143,4	143,4	143,4	143,4	143,4	156,2	165,8	184,2	
20,6	438,1	69,4	69,4	69,4	69,4	79,1	88,9	98,8	95,7	105,6	125,1	
23,3	429,9	74,1	74,1	74,1	74,1	83,9	93,8	103,8	93,5	93,3	109,8	
25,9	424,1	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	61,4	61,2	70,8	
28,6	423,7	62,5	76,7	85,5	75,2	96,8	95,8	124,3	121,7	130,5	150,2	
31,3	416,1	80,7	80,7	80,7	80,7	84,1	83,2	101,4	99,9	99,2	99,2	
34,0	413,9	33,2	63,2	62,0	80,9	77,9	76,8	76,4	93,2	92,6	102,0	
36,6	412,1	70,1	70,1	70,1	70,1	70,1	70,1	70,1	71,3	79,5	89,1	
39,3	408,0	59,3	75,9	83,1	73,7	86,2	93,8	93,1	110,3	109,4	118,6	
42,0	406,1	39,2	39,2	39,2	39,2	47,9	57,1	66,7	74,2	96,0	104,4	
44,7	395,1	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	29,6	37,1	45,9	65,0	65,1	
47,3	369,1	10,9	10,9	10,9	10,9	19,9	28,9	55,4	53,5	62,9	52,5	
50,0	365,8	6,5	16,0	25,7	35,6	32,7	52,8	36,2	68,0	87,1	85,9	
52,7	365,0	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	
55,3	360,2	7,7	25,1	30,7	27,0	40,0	38,2	46,6	62,8	71,4	101,0	
58,0	356,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	43,5	42,4	69,0	78,0	87,5	
60,7	350,8	60,9	60,9	60,9	61,6	60,9	64,8	80,9	78,8	77,9	77,5	
63,4	348,2	29,1	29,1	29,1	29,1	29,1	29,1	31,7	30,9	42,5	30,6	
66,0	347,4	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	18,3	27,8	37,6	
68,7	345,0	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	83,7	
71,4	340,7	44,3	52,4	60,9	69,9	68,5	77,5	67,7	85,7	95,1	94,8	
74,1	340,6	5,5	5,5	5,5	5,5	18,7	17,8	26,6	35,6	35,1	57,5	
76,7	325,8	11,3	11,3	12,3	21,6	20,2	29,5	19,4	36,5	45,8	45,6	

79,4	289,9	13,7	13,7	13,7	14,4	20,6	20,1	38,8	37,5	37,1	36,7
82,1	286,4	0	0	0	0	0	0	18,4	15,3	23,6	43,5
84,8	264,9	0	0	0	0	0	0	0	0	4,6	9,6
87,4	257,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	13,1
90,1	255,1	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,9	9,5	18,3	34,6	24,6
92,8	248,6	0	0	0	8,7	14,6	22,2	30,9	30,5	51,8	50,9
95,5	232,2	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	8,9
98,1	219,3	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	25,4	34,4

Анализ табл. 1 показывает, что вероятность возникновения внутрипочвенного стока существует как при орошении, так и при естественном увлажнении. При естественном увлажнении величина стока возрастает с повышением количества сезонных дождей, однако часто существенно отличается при одной и той же сумме осадков за сезон. Так, к примеру, при обеспеченности по осадкам в 50 % величина стока составляет 6,5 мм, а при обеспеченности в 52,7 % уже достигает 61,5 мм, хотя суммы осадков примерно равны. Из этого следует вывод, что внутрипочвенный сток может наблюдаться даже в засушливые годы, поскольку на его величину определяющее значение оказывает не сумма, а внутривегетационное распределение атмосферных осадков. Кроме того, величина стока заметно повышается при орошении пропорционально росту предполивного порога.

Для того, чтобы оценить насколько увеличивается сток из-за орошения, вычтем значение стока при естественном увлажнении от значений стока, полученных при орошении (табл. 2).

Таблица 2. Величина внутрипочвенного стока, вызванного орошением

Обеспеченность по осадкам, %	Внутрипочвенный сток, вызванный орошением при предполивном пороге, мм								
	$W_{III} = 0,6$ НВ			$W_{III} = 0,7$ НВ			$W_{III} = 0,8$ НВ		
	Среднеголетняя оросительная норма, мм								
	50	58	67	65	73	85	93	104	112
	Поливная норма, мм								
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,5	–	–	–	0	0	3,2	10,4	9,9	29,0
7,2	–	–	–	0	0	0	9,8	19,7	30,0
9,9	–	–	–	8,5	17,5	27,2	44,1	53,9	53,2
12,6	8,9	18,0	27,5	25,8	34,6	24,3	42,8	52,3	52,2
15,2	–	–	–	7,8	16,4	25,5	24,4	34,1	53,9
17,9	0	0	0	0	0	0	12,8	22,4	40,8
20,6	–	–	–	9,7	19,5	29,4	26,3	36,2	55,7
23,3	–	–	–	9,8	19,7	29,7	19,4	19,2	35,7
25,9	–	–	–	–	–	–	18,4	18,2	27,8
28,6	14,2	23,0	12,7	34,3	33,3	61,8	59,2	68,0	87,7
31,3	0	0	0	3,4	2,5	20,7	19,2	18,5	18,5
34,0	30,0	28,8	47,7	44,7	43,6	43,2	60,0	59,4	68,8
36,6	–	–	–	–	–	–	1,2	9,4	19,0
39,3	16,6	23,8	14,4	26,9	34,5	33,8	51,0	50,1	59,3
42,0	–	–	–	8,7	17,9	27,5	35,0	56,8	65,2
44,7	–	–	–	0	2,2	9,7	18,5	37,6	37,7
47,3	0	0	0	9,0	18,0	44,5	42,6	52,0	41,6
50,0	9,5	19,2	29,1	26,2	46,3	29,7	61,5	80,6	79,4
52,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55,3	17,4	23,0	19,3	32,3	30,5	38,9	55,1	63,7	93,3
58,0	0	0	0	0	1,1	0,0	26,6	35,6	45,1
60,7	0	0	0,7	0	3,9	20,0	17,9	17,0	16,6
63,4	0	0	0	0	0	2,6	1,8	13,4	1,5
66,0	–	–	–	–	–	–	8,3	17,8	27,6
68,7	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	5,0
71,4	8,1	16,6	25,6	24,2	33,2	23,4	41,4	50,8	50,5
74,1	0	0	0	13,2	12,3	21,1	30,1	29,6	52,0
76,7	0	1,0	10,3	8,9	18,2	8,1	25,2	34,5	34,3
79,4	0	0	0,7	6,9	6,4	25,1	23,8	23,4	23,0
82,1	0	0	0	0	0	18,4	15,3	23,6	43,5
84,8	0	0	0	0	0	0	0	4,6	9,6
87,4	0	0	0	0	0	0	0	0	7,6
90,1	0	0	0	0	0,4	0,0	8,8	25,1	15,1
92,8	0	0	8,7	14,6	22,2	30,9	30,5	51,8	50,9

95,5	0	0	0	0	0	0	0,6	0	8,9
98,1	0	0	0	0	0	0	0	4,5	13,5

Примечание: прочерками отмечены годы, когда орошение не проводилось.

В соответствии с данными табл. 2 наибольшая величина внутрипочвенного стока в годы, когда проводились поливы, наблюдается при обеспеченностях осадков от 28,6 до 50 %. Например, в год с обеспеченностью по осадкам 50 % при предполивном пороге в 0,6 НВ и норме полива 10 мм сток составил 9,5 мм, увеличиваясь до 79,4 мм при $W_{III} = 0,8$ НВ и норме полива 30 мм.

Как видим, внутрипочвенный сток увеличивается не только при повышении предполивного порога, но часто и при увеличении поливной нормы. Однако легко заметить, что значение предполивной границы оказывает более существенное влияние на величину стока, чем изменение нормы полива (табл. 2). Например, рост величины поливной нормы при предполивном пороге в 60% от НВ не оказывает существенного влияния на величину внутрипочвенного стока, чего нельзя сказать о стоке при более высоких предполивных границах.

Расчеты также показывают, что потери влаги на сток при высоких предполивных порогах могут достигать трети от оросительной нормы и более, что явно снижает экономическую эффективность орошения. Например, при предполивном пороге в 70 % от НВ снижение поливной нормы с 30 мм до 10 мм позволяет уменьшить оросительную норму почти на 30 %, что вполне оправдано при высокой стоимости забора и подачи воды на орошение. Вместе с тем следует учитывать, что следствием снижения поливных норм является рост числа поливов, что в свою очередь повышает затраты на орошение.

Заключение

Водобалансовые расчеты показывают, что в условиях неустойчивой влагообеспеченности почвы на территории Беларуси практически ежегодно испытывают как недостаток, так и избыток влаги. Причем в любой год внутрипочвенный сток может стать существенным расходным элементом водного баланса, особенно при орошении.

Установлено, что поливы повышают вероятность появления и величину стока при повышении предполивного порога. Например, потери влаги на сток при предполивном пороге в 0,8 НВ и традиционных нормах полива достигают трети от оросительной нормы. Однако с приближением величины поливной нормы к суточному водопотреблению растений при этом же предполивном пороге внутрипочвенный сток существенно снижается. При предполивном пороге в 70 % от НВ уменьшение поливной нормы с 30 мм до 10 мм позволяет снизить оросительную норму почти на 30 %. В свою очередь изменение величины поливной нормы при предполивном пороге в 60 % от НВ не оказывает существенного влияния на величину внутрипочвенного стока.

Таким образом, снижение величины внутрипочвенного стока при орошении является существенным резервом экономии поливной воды. Вместе с тем следует учитывать, что следствием снижения поливных норм является рост числа поливов, что в свою очередь повышает затраты на орошение. Поэтому очевидной является необходимость технико-экономической оптимизации режима орошения с целью максимального повышения его эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голченко, М. Г. Оросительные мелиорации в Республике Беларусь: потребность, эффективность, направления совершенствования / М. Г. Голченко // Комплексні мелиорації ландшафті: стан, проблеми, перспективи: збір. Матеріалів Міжнарод. наук.-практ. конф., Херсон, 24–26 квіт. 2013 р. / Херсонський держ. аграр. ун-т. – Херсон: РВВ «Колос», 2013. – Вип. 6. – С. 64–70.
2. Лихацевич, А. П. Сельскохозяйственные мелиорации: учебник для студ. высш. учеб.завед. по спец. «Мелиорация и водное хозяйство» / А. П. Лихацевич, М. Г. Голченко, Г. И. Михайлов; под ред.: А. П. Лихацевича. – Минск: ИВЦ Минфина, 2010. – 319 с.
3. Вихров, В. И. Ретроспективные расчеты водного баланса почв и неблагоприятных явлений с применением ПЭВМ: лекция / В. И. Вихров // Расчет элементов водного баланса и вероятности наступления неблагоприятных водных явлений в условиях естественного водного режима почв. – Горки, 2006. – Ч. 1. – 11 с.
4. Муромцев, Н. А. Закономерности накопления, потерь и возврата влаги и химических веществ при внутрипочвенном влагообмене / Н. А. Муромцев, Н. А. Семенов, Ю. А. Мажайский, К. Б. Анисимов // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. – 2014. – №76. – С. 111 – 125.

5. Усовершенствованный алгоритм управления орошением в производственных условиях / А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина, И. А. Романов, С. В. Набздоров // Современные методики, инновации и опыт практического применения: материалы Международной научно-практической конференции (Минск, 19 – 20 октября 2017 г.) / Национальная академия наук Беларуси, Институт мелиорации; ред.: Н. К. Вахонин [и др.]. – Минск, 2017. – С. 30–40.

6. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП/ПР 45-3.04.2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.

7. Лихацевич, А. П. Расчет водного баланса почвы при краткосрочном переувлажнении / А. П. Лихацевич, И. А. Романов // Мелиорация. – 2016. – № 4. – С. 6–17.