

УДК 631.425.2:551.58 (476)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВОДОБАЛАНСОВЫХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТОКА

В. И. Вихров, кандидат технических наук

И.А. Левшунов, инженер

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», Горки

Ключевые слова: водный баланс почвы, почвенный сток, регрессионный анализ, ретроспективный метод, гидромелиоративные режимы, проектные параметры

Введение

Основу оценки водного и гидромелиоративных режимов почвы составляет водный баланс ее корнеобитаемого слоя. Используемые в конкретных практических расчетах уравнения водного баланса почвы, как правило, представляют собой алгебраическую сумму его приходных и расходных элементов. Основными приходными элементами при этом являются атмосферные осадки (P , мм) и подпитывание расчетного почвенного слоя от грунтовых вод (W_{gp} , мм), а основными расходными составляющими – суммарное испарение (E , мм) и почвенный сток (C , мм).

При искусственном регулировании водного режима почв возникает задача рационального использования влагозапасов почвы, исключающего непродуктивный сток, объем которого должен быть израсходован на водопотребление сельскохозяйственных культур [1,2].

Известно, что для обеспечения объективных результатов расчетов все составляющие водобалансового уравнения должны отвечать принципу равноточности. Между тем анализ специальной литературы и выполненных ранее полевых опытов [3-5] показывают, что при расчётах водного баланса мелиорируемых почв почвенный сток является величиной наименее обоснованной по сравнению с другими элементами водного баланса. Это подтверждается тем, что в большинстве расчетных методик величина почвенного стока вычисляется как превышение текущих влагозапасов почвы (W , мм) над верхней границей их регулирования, равной наименьшей влагоемкости ($W_{нв}$, мм). При этом данное ограничение вводится, как правило, независимо от фильтрационных свойств почвы, дискретизации (временного интервала) расчетов и других условий, определяющих инерционность и динамику почвенного стока.

Выполненные ранее в условиях Горецкого района экспериментальные водобалансовые исследования [3,4], в частности, показали, что при значительном увлажнении суглинистых почв осадками их влажность продолжительное время (более декады) может превышать уровень НВ. В этом случае фактическая величина почвенного стока за рас-

четный интервал в пределах декады оказывается меньше превышения влагозапасов почвы над $W_{нв}$. В исследованиях [4] выявлено существенное изменение (увеличение) расчетного почвенного стока при уменьшении интервала расчетов от декады до суток. В результате, по данным [4], происходило соответствующее завышение оросительной нормы пастбища до 30-45%. На основании этого им сделан вывод о целесообразности увеличения аккумулирующей емкости и расчетного слоя почвы с 0,3 до 0,5 м, что частично сглаживает рост непродуктивного стока по мере уменьшения интервала расчетов.

Однако проведенный нами анализ полевых опытов и аналогичные модельные расчеты убеждают, что такой подход не устраняет исходной причины «неустойчивости» водобалансовых расчетов, которая на самом деле заключается в отсутствии учета *инерционности* фактического процесса почвенного стока.

Методика исследований

Методика изучения закономерностей почвенного стока и их влияния на результаты водобалансовых расчетов включала соответствующие модельные расчеты и специальные полевые исследования.

Для определения влияния дискретизации водобалансового расчета (n , сут) на величину почвенного стока выполнялись расчёты водного баланса многолетних трав для условий 2004-2009 гг. по экспериментальным и метеорологическим данным учебно-опытного оросительного комплекса «Тушково-1» Горецкого района. Расчеты проводились по упрощенному уравнению водного баланса:

$$W_{к}^i = W_{н}^i + K_{п}P_i - K_{в}E_i + m_i - C_i, \quad (1)$$

где $W_{к}^i$, $W_{н}^i$ – полезные влагозапасы расчетного слоя почвы соответственно на конец и начало i – го расчетного интервала, мм;

P_i – измеренные осадки, выпавшие за расчетный период, мм;

$K_{п}$ – поправочный коэффициент на недоучет осадков измерительными приборами;

$K_{в}$ – коэффициент влагообмена, учитывающий долю водопотребления из расчетного слоя.

E_i – водопотребление пастбищных трав за расчетный период, мм;

m_i – норма увлажнения, мм;

C_i – почвенный сток, мм.

Расчеты выполнялись для пяти вариантов дискретизации при $n = 1; 2; 3; 5; 10$ суток.

С целью экспериментального обоснования и количественной оценки закономерностей поверхностного и вертикального стока в условиях минеральных почв северо-восточной части Беларуси с 2005 г. организовано проведение специальных полевых исследований. Опытный участок расположен на суглинистых почвах учебно-опытного оросительного комплекса (УОК) «Тушково-1» Горецкого района.

В число основных задач полевых исследований входили: экспериментальное измерение почвенного стока (C , мм) и его составляющих – поверхностного ($C_{пл}$, мм) и вертикального стока ($C_{в}$, мм), а также систематические наблюдения за определяющими агрометеорологическими факторами.

Для экспериментального измерения поверхностного стока на указанном опытном участке были заложены шесть стоковых площадок, представляющих собой участки склона, изолированные от окружающей территории водонепроницаемыми бортиками и оборудованные устройствами для измерения объёма поверхностного стока в виде мерных баков [7]. Размеры площадок приняты 5×10 м с расположением длинной стороны вдоль уклона поверхности в соответствии с [8]. Почвы площадок дерново-подзолистые легкосуглинистые с глубоким (>5 м) залеганием УГВ.

Сельскохозяйственное использование площадок было следующее: площадки № 1 и 2 – свекла кормовая с уклонами поверхности соответственно 0,057 и 0,024; площадки № 3 и 4 – многолетние травы с уклонами 0,075 и 0,042; площадки № 5 и 6 – чистый пар с уклонами 0,053 и 0,025 соответственно. Посев семян свеклы на площадках №1 и 2 производился поперек склона с междурядьем 45 см. До высева семян и после уборки урожая эти площадки также содержались под паром. Площадки № 3 и 4 использовались как естественный сенокос. Наименьшая влагоемкость верхнего 20-сантиметрового слоя на пашне и сенокосе составляет соответственно 22,8 и 24,8% от массы сухой почвы.

Наблюдения за поверхностным стоком проводились на указанных стоковых площадках объемным способом по приращению уровня воды в мерных баках согласно методике, изложенной в [8].

Измерения суточных величин поверхностного стока проводились в дни выпадения атмосферных осадков и при определении влажности почвы через 5-7 суток. Два полевых дождемера были установлены в непосредственной близости от стоковых площадок. Одновременно на метеорологическом посту учебно-опытного комплекса, расположенном в 0,4 км от стоковых площадок, проводились наблюдения за температурой и влажностью воздуха, а также за интенсивностью дождя при помощи плювиографа. За вегетационные периоды (с 1.05 по 30.09) 2005 и 2006 гг. выпало соответственно 398 и 379 мм осадков, что составляет 115 и 110 % многолетней нормы.

Вертикальный почвенный сток и его динамика изучались методом заливаемых площадок [8], которые устраивались в непосредственной близости от стоковых.

Результаты и обсуждение

Полученные предварительные результаты расчетов по пяти вариантам уравнения (1) подтвердили факт существенного возрастания расчетного стока при уменьшении дискретизации расчетов. Например, за период с июня по август 2004 г. при $n = 10; 5; 3; 2; 1$ сутки суммарный расчетный сток ($\sum C_i$) составил соответственно 13,5; 20,8; 30,2; 33,0; 44,7 мм [3].

Результаты полевых исследований показали, что основными факторами, обуславливающими поверхностный сток, являются: величина и интенсивность атмосферных осадков, начальная влажность верхних слоёв почвы, уклон и состояние (сельскохозяйственное использование) поверхности участка.

Поскольку указанные факторы действуют независимо и параллельно, на первом этапе анализа исследовалась однофакторная корреляционная связь суточного поверхностного стока с величиной суточных осадков по отдельным стоковым площадкам. При этом для учета влияния на сток начальной влажности почвы все измеренные на площадках данные по стоку разделялись по трем отдельным выборкам с разными диапазонами влажности верхнего 20-сантиметрового слоя почвы W_H : 1 – ($W_H > 1,2W_{HB}$); 2 – ($W_H = 0,8-1,2 W_{HB}$); 3 – ($W_H < 0,8W_{HB}$). Данная дифференциация исследуемых выборок позволила уменьшить неоднородность эмпирических данных по фактору влажности почвы.

Регрессионный анализ экспериментальных данных показал, что наиболее приемлемой формой корреляционной связи исследуемых выборок поверхностного стока с осадками является степенная функция (с показателем степени $b > 1$):

$$C_n = aP^b, \quad (2)$$

где C_n – суточный поверхностный сток, мм; P – величина суточных осадков, мм; a, b – эмпирические коэффициенты.

Пример указанной зависимости (2) для стоковой площадки № 5 приведен на рис. 1. Полученные аналогичные графики для других площадок показывают, что наиболее существенное влияние осадков на поверхностный сток наблюдается при влажности почвы $W_H > 1,2W_{HB}$. Вместе с тем, определенный сток обнаруживается и при условии $W_H < W_{HB}$, что можно объяснить переувлажнением самых верхних слоев суглинистой почвы при большой интенсивности дождя.

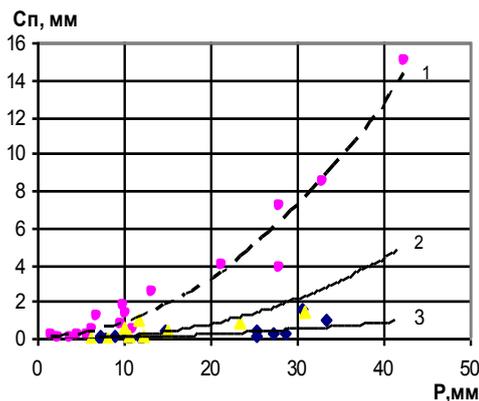


Рис.1 – Связь суточных величин поверхностного стока и осадков на стоковой площадке № 5 при разных диапазонах влажности почвы W_H

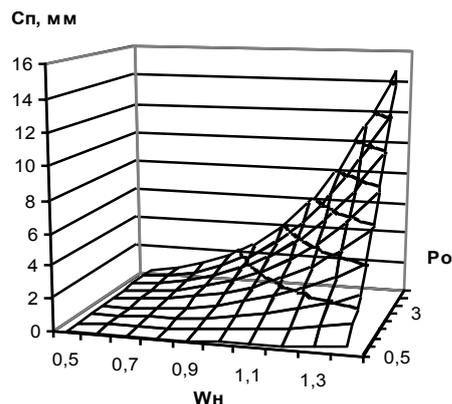


Рис.2 – Двухфакторная зависимость суточного поверхностного стока от осадков и влажности почвы на стоковой площадке № 5

При обосновании двухфакторной зависимости стока от осадков и начальной влажности почвы нами использован метод преобразования и последовательного введения переменных [3].

В результате компьютерной обработки получены расчетные двухфакторные зависимости для поверхностного стока:

$$C_n = aP_o^b W_H^{b_1} \quad (3)$$

где P_o – суточные осадки, выраженные в см слоя ($P_o = P/10$);

W_H – начальные влагозапасы почвы в слое 0-20 см в долях от W_{HB} ;

a, b, b_1 – эмпирические коэффициенты.

Пример двухфакторной функции (3) для стоковой площадки №5 показан на рис.2.

Значения эмпирических коэффициентов и корреляционного отношения r зависимости (3) для отдельных стоковых площадок приведены в табл.1.

Таблица 1. Эмпирические коэффициенты зависимости (2) по опытным стоковым площадкам

Номер варианта (стоковой площадки)	a_0	b	b_1	Корреляционное отношение r
1	0,24	1,52	4,42	0,67
2	0,05	1,11	2,79	0,76
3	0,05	1,39	2,73	0,75
4	0,01	1,19	2,63	0,73
5	0,34	1,61	3,98	0,66
6	0,06	1,13	3,24	0,68

Число опытных данных при получении двухфакторной зависимости (3) принято одинаковым по всем площадкам и составило 40 параллельных измерений C_n, P_o и W_H . Пределы применения полученных зависимостей следующие: $0 \leq P_o \leq 1,45$; $0,5 \leq W_H \leq 1,35$.

Количественный анализ формулы (3) для отдельных вариантов опытов показал, что при влажности почвы, равной стоковой границе W_{HB} , максимальный вызываемый осадками сток отмечается на вариантах 5 и 1 (площадки с паром и свеклой на большем уклоне). Согласно (2), поверхностный сток достигает при этом соответственно 7,2 и 4,9% от величины осадков. Минимальный поверхностный сток характерен для варианта 4 (сенокос на меньшем уклоне), где при влажности на уровне наименьшей влагоемкости он составляет всего 0,1% выпадающих осадков.

С целью учета различной динамики почвенного стока в зависимости от гранулометрического состава минеральных почв и введения переменной границы стока выше уровня W_{HB} в разработанных ранее алгоритмах компьютерных программ по ретроспективному моделированию водного режима почв (RETRO-1,2,3) [6] величина декадного почвенного стока (C^i , мм) определяется на основе следующей зависимости:

$$C^i = K_C (W_K - W_{HB}), \quad (4)$$

где W_k – влагозапасы почвы на конец i -й декады, превышающие наименьшую влагоемкость $W_{нв}$, мм;

K_C – коэффициент почвенного стока, зависящий от гранулометрического состава почвы ($K_C \leq 1$).

На данном этапе исследований значение K_C в декадном интервале расчетов рекомендуется принимать равным 1,0; 0,95 и 0,85 соответственно для легких, средних и тяжелых по гранулометрическому составу минеральных почв.

Для оценки влияния переменной границы стока с использованием формулы (4) на снижение его проектных сезонных величин и норм орошения выполнены ретроспективные расчеты водного баланса суглинистых почв в условиях оросительных мелиораций (программа RETRO-2) и осушительно-увлажнительных мелиораций (программа RETRO-3) по данным пяти метеостанций северо-восточной части Республики Беларусь.

Расчеты проводились для двух вариантов: а) с постоянной границей стока (при $K_C = 1$); б) с переменной границей (при $K_C = 0,85$). Результаты расчетов, выполненных за период с 1945 по 2005 г. для капусты поздней, приведены в табл.2. Величины $\Delta M_{25\%}$, $\Delta C_{25\%}$, являются разностью значений $M_{25\%}$, $C_{25\%}$ вариантов «а» и «б».

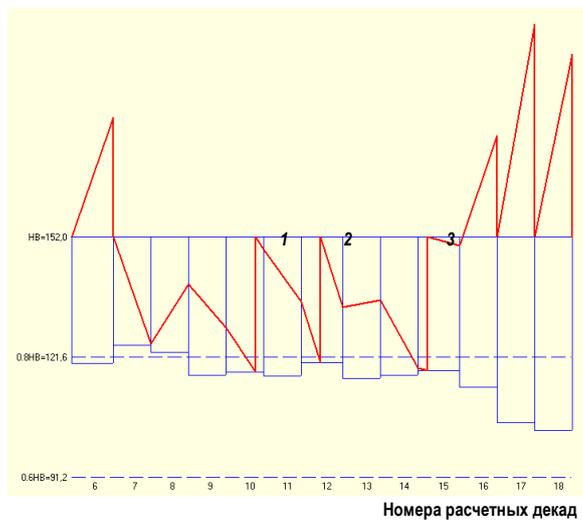
Таблица 2. Влияние коэффициента почвенного стока на проектные параметры норм орошения ($M_{25\%}$)

Метеостанция	$K_C = 1$		$K_C = 0,85$		$\Delta M_{25\%}, \%$	$\Delta C_{25\%}, \%$
	$M_{25\%}, \text{ мм}$ (RETRO-2)	$C_{25\%}, \text{ мм}$ (RETRO-3)	$M_{25\%}, \text{ мм}$ (RETRO-2)	$C_{25\%}, \text{ мм}$ (RETRO-3)		
Бобруйск	152	145	141	130	7,2	10,3
Витебск	114	190	104	170	8,8	10,5
Горки	131	170	122	155	6,9	8,8
Костюковичи	165	155	152	144	7,9	7,1
Могилев	147	137	138	126	6,1	8,0
В среднем	142	159	131	145	7,7	8,8

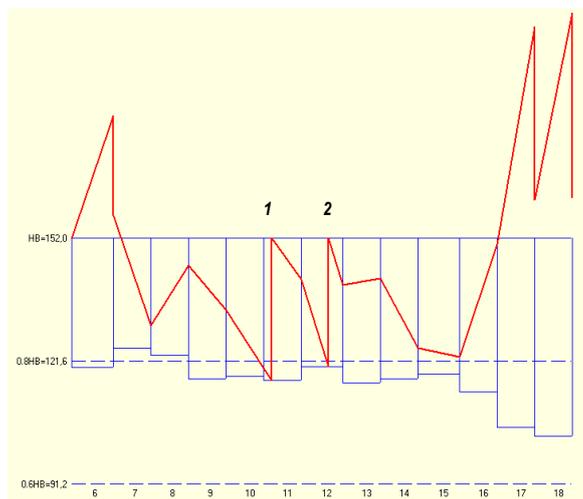
Как показывают данные табл.2, введение переменной границы стока при $K_C = 0,85$ в декадных расчетах позволяет сэкономить оросительные нормы и сезонный сток 25%-ной обеспеченности в среднем соответственно на 7,7 и 8,8%. В отдельные реальные годы указанный водосберегающий эффект может быть значительно большим. Например, рассчитанные по метеостанции Горки в условиях 1995 г. оросительные нормы капусты поздней для вариантов «а» и «б» составили соответственно 99,8 и 52,1 мм; сезонный сток соответственно 156 и 108 мм. Как видно из рис.3, это позволило сократить число поливов с трех до двух.

В расчетах по программе RETRO-2 использовался вариант с глубоким залеганием уровня грунтовых вод (УГВ) и с переменным нижним пределом оптимального увлажнения почвы (рис.3), учитывающим среднедекадную эффективную температуру воздуха [6].

Алгоритм программы RETRO-3 основан на взаимосвязи водного баланса корнеоби-



а



б

Рис.3. – Графики расчетной динамики влагозапасов суглинистой почвы под орошаемой капустой по данным метеостанции Горки в условиях 1995 г.: а – $K_c = 1$; б – $K_c = 0,85$. 1, 2, 3 – номера требуемых поливов

таемого слоя мелиорируемой почвы и декадной динамики УГВ, регулируемой в пределах требуемого безопасного диапазона. При этом дренажный сток минеральных и торфяных почв рассчитывается соответственно по формулам, полученным В.И.Вихровым [6]:

$$C_{д}^i = 56 \sqrt{K_{ф}} \Delta H_{д}^i \bar{1,333} \quad (5)$$

$$C_{д}^i = 116 K_{ф}^{0,375} (\Delta H_{д}^i)^{1,750}, \quad (6)$$

где $C_{д}^i$ – дренажный сток i -й декады, мм; $K_{ф}$ – коэффициент фильтрации почвогрунта в зоне регулирования УГВ, м/сут; $\Delta H_{д}^i$ – требуемое снижение УГВ, обеспечиваемое дренажным стоком, м.

Дальнейшее проведение и обобщение экспериментальных исследований направлено на уточнение зависимостей вида (4) и их адаптацию в алгоритм расчетов водного баланса мелиорируемых почв.

Выводы

1. Использование постоянной расчетной границы почвенного стока на уровне наименьшей влагоемкости средних и тяжелых по гранулометрическому составу минеральных почв приводит к необоснованному завышению проектных параметров осушительно-увлажнительных режимов и нерациональному использованию водных ресурсов.

2. Выполненные исследования показали, что изменчивость границы почвенного стока должна иметь нелинейный характер и учитывать дискретизацию водобалансовых расчетов.

3. Для объективной оценки почвенного стока необходимо дальнейшее научно-экспериментальное обоснование его зависимости от основных факторов в конкретных почвенно-климатических и хозяйственных условиях.

Литература

1. Вихров, В. И. Ресурсосберегающие алгоритмы расчетов проектных норм орошения трав в условиях Беларуси / В.И. Вихров // Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии и техника в орошаемом земледелии. Сб. науч. докл. междунар.науч.-практ. конф. – Коломна, 2003. – Ч. 1. – С. 81-84.
2. Левшунов, И. А. Влияние дискретизации расчётов водного баланса мелиорируемых почв на величину стока / И.А. Левшунов, В.И. Вихров // Ресурсосбережение и экология в сельском хозяйстве: материалы VII респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, посвящённой 165-летию академии, Горки, 19-21 апреля 2005 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. сельскохоз.акад.; редкол.: А.Р.Цыганов [и др.]. – Горки, 2005. – Ч. 1. – С. 232-233.
3. Вихров, В.И. Оперативное планирование и прогноз режима орошения многолетних трав на минеральных почвах Белоруссии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Вихров В.И.; ВНИИГиМ. – М., 1988. – 24 с.
4. Белясов, В.И. Исследование вопросов согласования проектного и эксплуатационного режимов орошения культурного пастбища / В.И. Белясов // Мелиорация и гидротехника в БССР: сб. науч. тр. / БелСХА. – Горки, 1981. – С. 29-31.
5. Вихров, В.И. Прогноз весенних влагозапасов суглинистых почв под орошаемыми травами в Белоруссии / В.И. Вихров // Водное хозяйство и гидротехн. строительство: респ. межвед. сб. – Минск, 1987. Вып.16. – С. 29-33.
6. Вихров, В. И. Ретроспективные расчеты водного баланса почв и неблагоприятных водных явлений с применением ПЭВМ. Лекция для студ. специальности 1-74 05 01 / В.И. Вихров. – Горки, 2006. – 28 с.
7. Водогрецкий, В.Е. Воднобалансовые экспедиционные исследования / В.Е. Водогрецкий, О.И. Крестовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 149 с.
8. Методические указания управлениям гидрометслужбы №84: производство комплексных воднобалансовых наблюдений на пунктах опорной сети / Гос. гидрологич. институт – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 160 с.

Summary

Vikhrov V., Levshunov I. Improvement of algorithm of water balance calculations considering objective laws of land drainage

Results of model calculations and field experiments on land drainage study in loamy soils. Functions with two parameters (sediments and soil moisture dependence of daily drainage) obtained while different agricultural application. Advisability of application of variable drainage limit for calculations improvement of reclaimed soils water balance.

Поступила 07 мая 2010 г.