

УДК 631.671.1

А. П. ЛИХАЦЕВИЧ

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВОДНЫХ РЕЖИМОВ ПОЧВ

*Институт мелиорации*

*(Поступила в редакцию 22.07.2008)*

**Введение.** Вода для сельскохозяйственных культур является одним из основных компонентов, определяющих условия и конечный результат их развития, причем наряду с минеральным питанием растений водный фактор доступен для активного регулирования, что предопределило необходимость изучения и совершенствования соответствующих способов и технологий управления им.

Водный режим растений напрямую связан с водным режимом почв, реализуясь через баланс влаги в корнеобитаемом слое. К настоящему времени определены основные показатели, характеризующие его. К ним помимо водопотребления сельскохозяйственных культур традиционно относят атмосферные осадки, поверхностный сток, интенсивность влагообмена между корнеобитаемым слоем почвы и уровнем грунтовых вод. Интегрирующим показателем водного режима почв являются влагозапасы (влажность) в корнеобитаемой зоне.

Вместе с тем многообразие условий, связанное как с пестротой почвенного покрова, так и с изменчивостью погоды на территории Беларуси (в том числе и в многолетнем разрезе), не позволяет однозначно представлять установленные характеристики водного режима, например, для растений на песчаных и торфяных почвах Полесья или на разных типах почв Белорусского Поозерья, а современные технологии регулирования водного режима почв требуют однозначности в обобщенной его оценке с учетом требований растений.

Цель настоящей работы – определить критерии оценки водных режимов почв и разработать для этого соответствующие количественные характеристики.

**Постановка задачи.** Для согласования многообразия условий в физических моделях принято использовать теорию подобия, с помощью которой определяются обобщенные переменные, называемые *критериями подобия* [1]. Всякое решение, представленное с помощью критериев подобия, становится справедливым уже не для одного набора параметров задачи, характеризующих локальные условия, а для всех комбинаций параметров, которые дают совпадающие значения критериев подобия.

Существует стандартный способ установления структуры и количества критериев подобия – так называемая  $\pi$ -теорема, применяемая при анализе функций, описывающих исследуемый процесс [1]. В частности, водный режим растений можно представить в виде баланса влаги (влагопереноса) в корнеобитаемом слое почвы.

Широко известна термодинамическая модель влагопереноса. Вместе с тем в основе термодинамического моделирования потока влаги по внутрисочвенному поровому пространству лежит предположение, что почва представляет собой сплошную однородную среду, а почвенная влага в ней подобна примеси, концентрация которой подвержена пространственно-временной изменчивости.

Данное допущение не всегда корректно. Например, Н. М. Химин показал, что концепция сплошной среды, лежащая в основе термодинамического подхода к моделированию влагопереноса в почвогрунтах, неприменима к корнеобитаемому слою почвы (КСП). С точки зрения автора, по точности задания внешних условий более согласованным является интегральное уравнение водного баланса [2]

$$\frac{dW}{dt} = -\varepsilon + p - g \pm q, \quad (1)$$

где  $W$  – суммарный запас влаги в расчетном слое почвы;  $\varepsilon$  – интенсивность эвапотранспирации (функция почвенной влажности);  $p$  – интенсивность атмосферных осадков, поступающих на поверхность почвы;  $g$  – интенсивность поверхностного стока;  $q$  – плотность потока влаги через границу между корнеобитаемым и подстилающим слоем.

Недостатки термодинамического подхода к моделированию влагопереноса в корнеобитаемом слое почвы, отмеченные Н. М. Химиным, безусловно, существенны. Вместе с тем и в уравнении (1) присутствует допущение, искажающее физическую природу таких элементов баланса, как атмосферные осадки и поверхностный сток. Если изменение влагозапасов в КСП, эвапотранспирация и влагообмен КСП с нижележащими почвенными слоями происходят непрерывно и функции, связывающие эти составные элементы водного баланса, интегрируемы, то, например, осадки, как и поверхностный сток, дискретны, а функции, выражающие их изменения во времени, имеют разрывы, т. е. неинтегрируемы. Данная особенность требует соответствующего учета.

Атмосферные осадки напрямую влияют на содержание влаги в почве, которое в течение суток меняется практически скачкообразно. Однако принципиальных трудностей в учете атмосферных осадков при расчете водного баланса КСП нет, если составные элементы водного баланса, входящие в уравнение (1), рассчитываются (измеряются) пошагово с расчетным интервалом не менее суток, что не противоречит установленной практике, когда расчетный интервал обычно принимается равным пентаде, неделе, декаде, месяцу и т. д.

**Применение теории подобия к водному балансу почвы.** Из теории подобия известно, что всякое соотношение между  $n$ -размерными величинами, для измерения которых использовано  $k$  основных единиц измерения, можно представить в виде соотношения между  $(n-k)$  безразмерными комбинациями этих величин, которые и будут являться критериями подобия. В уравнении (1) имеем шесть величин ( $W, t, \varepsilon, p, g, q$ ). Представим их размерности:

$$\dim W = L; \dim t = T; \dim \varepsilon = \dim p = \dim g = \dim q = LT^{-1},$$

где  $L$  – размерность длины;  $T$  – размерность времени.

Выделим элементы уравнения (1) с независимыми размерностями. К ним можно отнести показатели влагозапасов и времени. Остальные составляющие имеют размерности, производные от длины и времени. Следовательно, в соответствии с  $\pi$ -теоремой, число критериев подобия при оценке водного режима в системе «растение – окружающая среда» должно быть равно четырем [1].

Поскольку водный режим почв анализируется с позиций его благоприятности для растений, то мерой оценки окружающей среды (атмосферы и почвы) должен служить показатель водопотребления. С учетом этого обстоятельства составим безразмерные комбинации размерных величин, входящих в уравнение (1), представив их в виде прообразов искомым критериев подобия и обозначив символом  $\lambda$ :

$$\lambda_p = \frac{\mu(p)}{\mu_p(\varepsilon)}; \lambda_W = \frac{\mu(W)}{\mu_W(t)\mu_W(\varepsilon)}; \lambda_q = \frac{\mu(q)}{\mu_q(\varepsilon)}; \lambda_g = \frac{\mu(g)}{\mu_g(\varepsilon)}, \quad (2)$$

где  $\mu(p)$ ,  $\mu(W)$ ,  $\mu(q)$ ,  $\mu(g)$  – масштабы показателей окружающей среды: осадков, почвенных влагозапасов, внутрипочвенного влагообмена и поверхностного стока соответственно;  $\mu_p(\varepsilon)$ ,  $\mu_W(\varepsilon)$ ,  $\mu_q(\varepsilon)$ ,  $\mu_g(\varepsilon)$  – масштабы показателя водопотребления относительно осадков, почвенных влагозапасов, внутрипочвенного влагообмена и поверхностного стока соответственно;  $\mu_W(t)$  – масштаб времени относительно почвенных влагозапасов.

**Критерии подобия водных режимов почв.** Учитывая непредсказуемость и дискретный характер атмосферных осадков, для их оценки целесообразно выбрать достаточно продолжительный период: декаду, месяц, вегетацию. Анализ возможных вариантов показывает, что возможны любые варианты, но наиболее показательным является весь вегетационный период. Если при

этом в качестве показателя водопотребления принять испаряемость, то первый критерий подобия водных режимов растений (2) может быть представлен соотношением

$$\lambda_p = \frac{P}{E_0}, \quad (3)$$

где  $P, E_0$  – сумма атмосферных осадков и испаряемость за расчетный период соответственно.

Вполне очевидно, что полученная зависимость может служить в качестве *критерия зональности*. Заметим, что соотношение (3) в различных модификациях давно используется для оценки степени засушливости климата. Известны подобные выражению (3) формулы, представляющие так называемый гидротермический коэффициент, или коэффициент Г. Т. Селянинова и т. д.

Второй безразмерный комплекс (2) характеризует взаимоотношение содержания почвенной влаги и водопотребления. В качестве масштаба почвенных влагозапасов могут использоваться несколько характеристик. Назовем возможные варианты: водовместимость почвы (полная влагоемкость), водоудерживающая способность (наименьшая влагоемкость), верхний и нижний пределы оптимальных влагозапасов, верхний предел недоступных влагозапасов (влажность устойчивого завядания), а также комбинации этих величин.

В свою очередь, в качестве масштаба времени также могут выбираться разные периоды. Все зависит от решаемой задачи. Соответствующим образом, за тот же период, устанавливается и показатель водопотребления.

Определив масштабы элементов водного баланса из условия их оценки в течение непродолжительного периода, можем представить безразмерный комплекс  $\lambda_W$  как

$$\lambda_W = \frac{W}{\tau \varepsilon}, \quad (4)$$

где  $W$  – показатель почвенных влагозапасов, который может быть приравнен к одной из указанных выше характеристик рассматриваемой почвы или некоторой их функции;  $\tau$  – масштаб времени ( $\mu_W(t) = \tau = 1 \text{сут}$ );  $\varepsilon$  – среднесуточная за расчетный период интенсивность водопотребления (эвапотранспирации).

По аналогии с выражением (4) можно представлять третий и четвертый критерии подобия водных режимов почв ( $\lambda_q$  и  $\lambda_g$ ). Подчеркнем, что и в этом случае масштабы потока влаги через границу между корнеобитаемым и подстилающим слоем  $\mu(q)$  и поверхностного стока  $\mu(g)$  выбираются в соответствии с заданными масштабами водопотребления  $\mu_q(\varepsilon)$  и  $\mu_g(\varepsilon)$ .

Таким образом, для полной объективной количественной оценки водных режимов почв помимо *критерия зональности*  $\lambda_p$  необходимо знать численные значения критерия подобия  $\lambda_W$ , который назовем *критерием почвенной влагообеспеченности (влагообеспеченности корнеобитаемой зоны)*, и критерии подобия  $\lambda_q$  и  $\lambda_g$ , которые соответственно назовем *критерием внутрипочвенного влагообмена* и *критерием поверхностного стока*.

**Обсуждение и анализ.** Из представленных выше показателей наименее изученным является критерий почвенной влагообеспеченности. Рассмотрим возможные его значения, используя простейшую аппроксимацию связи  $\varepsilon(W)$ . Известна формула М. И. Будыко [3]

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \frac{W}{W_{\text{н.в}}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  – максимальная интенсивность эвапотранспирации, которая достигается при насыщении почвы влагой до наименьшей влагоемкости ( $W_{\text{н.в}}$ ).

Подставляя зависимость (5) в уравнение (4), получаем

$$\lambda_W = \frac{W_{\text{н.в}}}{\tau \varepsilon_{\max}}. \quad (6)$$

Следовательно, в соответствии с формулой М. И. Будыко (5), критерий почвенной влагообеспеченности для сельскохозяйственной культуры в первом приближении имеет постоянное значение в конкретных почвенно-климатических условиях во всей области определения

$$0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}; 0 \leq W \leq W_{\text{н.в.}} \quad (7)$$

Используем известное положение теории подобия, утверждающее, что любая математическая комбинация из критериев подобия может также являться критерием подобия. Разделив формулу (6) на выражение (4), получаем

$$\frac{\lambda_{Wm}}{\lambda_W} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \frac{W_{\text{н.в.}}}{W} = 1. \quad (8)$$

Обозначим

$$\lambda_{\varepsilon 0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}, \quad (9)$$

$$\lambda_{W0} = \frac{W}{W_{\text{н.в.}}}, \quad (10)$$

где  $\lambda_{\varepsilon 0}$  – относительная эвапотранспирация;  $\lambda_{W0}$  – относительные влагозапасы.

В соответствии с формулами (9) и (10)

$$\frac{\lambda_{Wm}}{\lambda_W} = \frac{\lambda_{\varepsilon 0}}{\lambda_{W0}}. \quad (11)$$

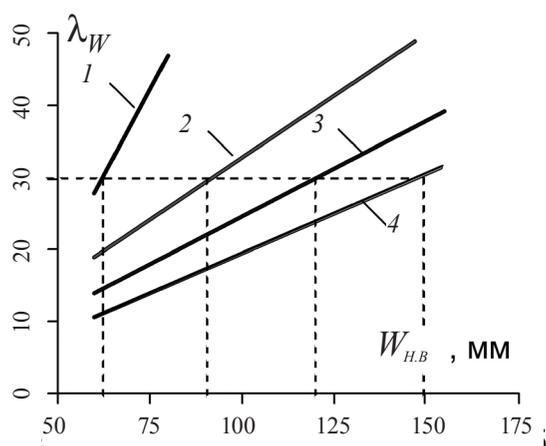
Таким образом, равные между собой, согласно зависимости (5), численные значения относительной эвапотранспирации и относительных влагозапасов также можно рассматривать в качестве критериев подобия, производных от формулы (4).

В соответствии со структурой характеристик (9) и (10) эти показатели можно назвать критериями текущей влагообеспеченности сельскохозяйственной культуры. Данное название подчеркивает тот факт, что при попарном равенстве критериев (9) и (10) можно утверждать о подобии атмосферных и почвенных условий в системе «растение – среда обитания» в данный момент времени.

Отметим, что показатель (9) похож на критерий и своей безразмерной структурой. Неслучайно он присутствует в моделях водного обмена на орошаемых землях в качестве обобщенной характеристики влагообеспеченности растений [4]. Вместе с тем, как показано выше, наиболее общим критериальным показателем, характеризующим условия текущей влагообеспеченности растений, является соотношение (4).

#### Зависимость критерия влагообеспеченности корнеобитаемой зоны от водоудерживающей способности почв

Показатель	Тип почвы по гранулометрическому составу и степень окультуренности						
	песчаные		супесчаные		суглинистые		
	средняя	высокая	средняя	высокая	средняя	высокая	
Мощность корнеобитаемого слоя, см	50	50	45	45	40	40	
Наименьшая влагоемкость, мм	65	80	105	120	140	155	
Критерий почвенной влагообеспеченности при интенсивности эвапотранспирации 3 и 5 мм/сут	3	21,7	26,7	35,0	40,0	46,7	51,7
	5	13,0	16,0	21,0	24,0	28,0	31,0



Критерий почвенной влагообеспеченности как функция эвапотранспирации: 1 – 2 мм/сут, 2 – 3 мм/сут, 3 – 4 мм/сут, 4 – 5 мм/сут

Используем критерий почвенной влагообеспеченности  $\lambda_W$  при сравнении водных режимов почв. В соответствии с выражением (6) численные значения критерия  $\lambda_W$  снижаются с ростом жесткости условий, т. е. при снижении водоудерживающей способности почвы и увеличении иссушающей способности атмосферы.

В таблице приведены значения критериев влагообеспеченности корнеобитаемой зоны (6) для минеральных почв при заданных уровнях суточной эвапотранспирации сельскохозяйственной культуры. На основании этих расчетных данных построены графики связи критерия почвенной влагоемкости с водоудерживающей способностью почв (см. рисунок).

Как видим, одно и то же значение критерия почвенной влагообеспеченности ( $\lambda_W = 30$ ) будет иметь на песчаных (по гранулометрическому со-

ставу) почвах при максимальной интенсивности эвапотранспирации, равной 2–3 мм/сут, на супесчаных – 3–4 мм/сут, а на суглинистых почвах – 4–5 мм/сут. Следовательно, сельскохозяйственные культуры на мелиорированных почвах песчаного гранулометрического состава в одной и той же природно-климатической зоне требуют проведения увлажнительных мероприятий в 1,5 раза чаще, чем на супесчаных, и в 2 раза чаще, чем на суглинистых почвах.

**Заключение.** При согласовании мелиоративных мероприятий можно количественно оценивать водные режимы сельскохозяйственных культур не только на однотипных почвах одного хозяйства или административного района, но и на любых почвах, расположенных в разных регионах. Для этого используются установленные критерии оценки водных режимов почв (зональности, почвенной влагообеспеченности, поверхностного стока и внутрипочвенного влагообмена), учитывающие обеспеченность атмосферными осадками, водоудерживающую способность почв, возможный поверхностный сток, эвапотранспирацию (водопотребление) возделываемых сельскохозяйственных культур и внутрипочвенный влагообмен.

## Литература

1. С е н а Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1988. 432 с.
2. Х и м и н Н. М. Обоснование границ применимости термодинамических моделей влагопереноса в зоне аэрации // Метеорология и гидрология. 1988. № 8. С. 72–76.
3. Б у д ы к о М. И. Об определении испарения с поверхности суши // Метеорология и гидрология. 1955. № 1. С. 52–58.
4. К у з н е ц о в М. Я. Разработка и использование математических моделей для исследования водного обмена на мелиорируемых землях: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 06.01.02. / БелНИИМВХ. Минск, 1990. 17 с.

*A. P. LIKHATSEVICH*

## CRITERIA FOR ESTIMATION OF SOIL WATER REGIMES

### Summary

The similarity criteria of crop water regimes (zonality, soil water capacity and moisture exchange in soil) are determined on the basis of similarity theory with the use of  $\pi$ -theorem. The example of similarity conditions evaluation of crop water regimes in different conditions is presented.