

УДК 631.671:632.111

*А. П. ЛИХАЦЕВИЧ, А. В. ВАГА*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**

*Институт мелиорации*

*(Поступила в редакцию 06.03.2012)*

**Введение.** В последние годы в Беларуси возрастает интерес к орошению сельскохозяйственных культур как к одному из факторов интенсификации. Однако организация орошения в сельскохозяйственных предприятиях помимо затрат на приобретение оросительной техники требует обоснования и качественной разработки проектной документации.

Основным показателем, который используется при проектировании оросительных систем и обосновании режимов орошения, является водопотребление (эвапотранспирация) сельскохозяйственных культур. Данный показатель определяет необходимую интенсивность орошения в заданных условиях и поэтому составляет основу управления поливами растений как в открытом, так и в защищенном грунте.

В южных регионах России, отличающихся засушливым климатом, традиционно применяется методика расчета водопотребления сельскохозяйственных культур по среднесуточным температурам воздуха. Данная методика показала приемлемую точность и в Белорусском Полесье [1]. Ее продвижение по территории республики и использование в водобалансовых расчетах сдерживается отсутствием эмпирических коэффициентов пропорциональности между величиной водопотребления и температурой воздуха, которые должны устанавливаться по результатам полевых исследований. Проведение подобных опытов для разных культур в регионах страны весьма трудоемко и в настоящее время вряд ли возможно. Поэтому в условиях Беларуси традиционно для расчета эвапотранспирации используется дефицит влажности воздуха, который представляет собой разность между насыщающей и фактической упругостью (содержанием) водяного пара в воздухе при данных температуре и давлении [2]. Однако в качестве основного расчетного параметра предпочтительнее использовать температуры воздуха, мониторинг которых требует существенно меньших затрат, чем измерение дефицитов влажности воздуха.

Цель работы – исследование влияния температуры воздуха на водопотребление овощных культур и многолетних трав.

**Материалы и методы исследований.** По результатам полевых опытов, выполненных Институтом мелиорации и Белорусской государственной сельскохозяйственной академией в 70–80-е годы XX века, установлены так называемые биоклиматические коэффициенты (коэффициенты пропорциональности в зависимости между эвапотранспирацией и суточными дефицитами влажности воздуха), на основе которых разработаны отраслевые нормы и ведется проектирование оросительных систем [3]. Вместе с тем результаты этих исследований можно использовать также и для расчета коэффициентов пропорциональности между эвапотранспирацией и среднесуточными температурами воздуха. Для этого эвапотранспирация сельскохозяйственных культур сначала рассчитывается по определяемым в течение расчетного периода дефицитам влажности воздуха с использованием известных биоклиматических коэффициентов [3]. Затем водопотребление, найденное по дефицитам влажности воздуха, принимается в качестве исходного показателя и используется для установления коэффициентов пропорционально-

сти между эвапотранспирацией и измеренными температурами воздуха. Коэффициенты пропорциональности в зависимости эвапотранспирации от температур воздуха определяются по формуле

$$C_E = \frac{E}{\Sigma T} \quad (1)$$

где  $C_E$  – коэффициент пропорциональности эвапотранспирации и температуры воздуха, мм/°С;  $E$  – водопотребление (эвапотранспирация) сельскохозяйственной культуры, рассчитанное по биоклиматическим коэффициентам и дефицитам влажности воздуха за календарную декаду при оптимальном водном режиме почвы, мм;  $\Sigma T$  – сумма среднесуточных температур воздуха за тот же период, °С.

Определение водопотребления актуально в условиях Беларуси для сельскохозяйственных культур, орошение которых может дать экономический эффект, поэтому расчеты по данной методике выполнялись для овощных культур (капуста поздняя, морковь, свекла столовая) и многолетних трав. В качестве исходных показателей служили декадные значения температур и дефицитов влажности воздуха, измеренные на 42 метеостанциях Республики Беларусь за вегетационные периоды 1980–2009 гг. Для учета зональности результаты расчета по каждой декаде вегетационного периода осреднялись за 30-летний период отдельно по метеостанциям, расположенным в северной, центральной и южной гидролого-климатических зонах Беларуси.

На первом этапе исследований связь коэффициента пропорциональности с температурами воздуха в формуле (1) аппроксимировалась с применением линейной функции

$$C_E = a_0 + a_1 T_{cp} \quad (2)$$

где  $a_0$  – свободный член функции, имеющий размерность, мм/°С;  $a_1$  – интенсивность изменения коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) при колебаниях температуры воздуха, мм/(°С)<sup>2</sup>;  $T_{cp}$  – среднесуточная температура воздуха, осредненная за расчетный период (декаду), °С.

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 приведены статистические показатели связи (2) для ряда овощных культур и многолетних трав. Полученные результаты однозначно указывают на то, что водопотребление сельскохозяйственных культур, вычисленное по среднедекадным дефицитам влажности воздуха, в некоторых условиях весьма тесно коррелирует со среднесуточными температурами воздуха, причем четко просматривается тенденция повышения тесноты этой связи для всех культур при перемещении по территории Беларуси от северной к центральной и далее к южной гидролого-климатической зоне.

Т а б л и ц а 1. Статистические показатели линейной связи эвапотранспирации со среднедекадными температурами воздуха для формулы (3)

Показатель	Гидролого-климатическая зона				Среднее по республике
	северная	центральная	южная	центральная и южная (в среднем)	
<i>Капуста поздняя</i>					
$a_0$	– 0,092	– 0,062	– 0,091	– 0,067	– 0,066
$a_1$	0,018	0,016	0,016	0,016	0,016
$R^2$	0,841	0,942	0,937	0,913	0,872
<i>Свекла столовая</i>					
$a_0$	– 0,336	– 0,230	– 0,268	– 0,231	– 0,250
$a_1$	0,030	0,024	0,025	0,024	0,024
$R^2$	0,567	0,832	0,876	0,824	0,718
<i>Морковь</i>					
$a_0$	– 0,253	– 0,165	– 0,256	– 0,179	– 0,188
$a_1$	0,026	0,022	0,026	0,021	0,022
$R^2$	0,240	0,764	0,848	0,738	0,545

Показатель	Гидролого-климатические зоны				Среднее по республике
	северная	центральная	южная	центральная и южная (в среднем)	
<i>Пастбище на минеральных почвах</i>					
$a_0$	0,346	0,401	0,414	0,408	–
$a_1$	–0,010	–0,013	–0,013	–0,013	–
$R^2$	0,320	0,546	0,744	0,650	–
<i>Пастбище на торфяных почвах</i>					
$a_0$	0,410	0,478	0,480	0,478	–
$a_1$	–0,013	–0,016	–0,016	–0,016	–
$R^2$	0,319	0,544	0,693	0,624	–
<i>Сенокос</i>					
$a_0$	0,228	0,379	0,464	–	–
$a_1$	–0,0006	–0,010	–0,015	–	–
$R^2$	0,0003	0,086	0,298	–	–

Пр и м е ч а н и е.  $R^2$  – коэффициент детерминации линейной связи эвапотранспирации с осредненными за календарную декаду среднесуточными температурами воздуха.

Учитывая достаточно высокие коэффициенты детерминации, полученные при статистической обработке данных с использованием линейной зависимости (2), при расчете водопотребления орошаемых культур в первом приближении можно ориентироваться на функции (1) и (2), которые в итоге приводят к уравнению

$$E = n T_{cp} (a_0 + a_1 T_{cp}) \quad (3)$$

( $n$  – продолжительность расчетного периода, сут).

Область применения уравнения (3) ограничивается диапазоном колебаний среднедекадных температур воздуха (от 13 до 19 °С), наблюдаемым по метеостанциям Беларуси в течение вегетации за последние 30 лет.

В качестве примера на рис. 1 показана зависимость коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) от среднедекадных температур воздуха для капусты поздней. Коэффициент детерминации этой связи для данной культуры оказался наиболее высоким и существенным во всех гидролого-климатических зонах республики.

Достаточно тесная зависимость эвапотранспирации от среднедекадных температур воздуха во всех регионах Беларуси характерна и для свеклы столовой (см. табл. 1), поэтому установленные показатели тесноты связи позволяют обобщать эмпирические уравнения, полученные для регионов, и вести расчет водопотребления по среднедекадным температурам воздуха с исполь-

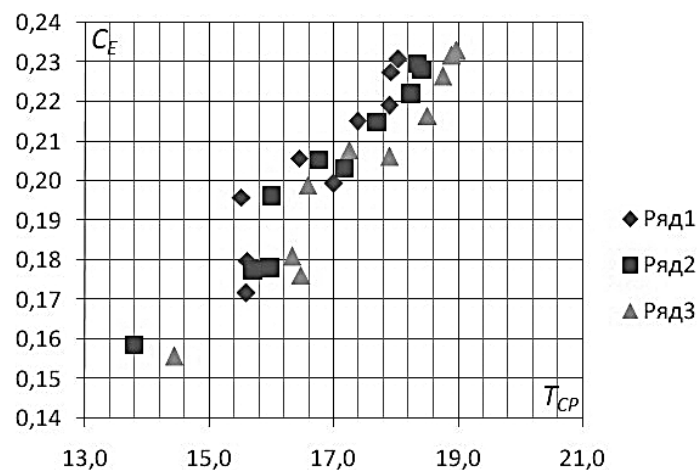


Рис. 1. Связь коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) эвапотранспирации и среднедекадных температур воздуха для капусты поздней в разных гидролого-климатических зонах Беларуси: ряд 1 – северная, ряд 2 – центральная, ряд 3 – южная

зованием одной зависимости для всей территории Беларуси у капусты поздней и свеклы столовой. В свою очередь, показатель тесноты линейной связи водопотребления с температурами воздуха для моркови оказался наименьшим из рассматриваемых овощных культур и существенным только в центральной и южной гидролого-климатических зонах республики. Аналогичный вывод справедлив и для пастбищ на минеральных и торфяных почвах. Поэтому при расчете водопотребления моркови и многолетних трав пастбищного использования одни показатели уравнения (3) могут быть использованы только в центральной и южной гидролого-климатических зонах республики (см. табл. 1).

В отличие от овощных культур и пастбищ для многолетних трав сенокосного использования связь между эвапотранспирацией и среднесуточными температурами воздуха оказалась несущественной во всех гидролого-климатических зонах Беларуси (см. табл. 1).

В качестве примера на рис. 2 показана зависимость коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) от среднедекадных температур воздуха для пастбищ на минеральных почвах. Как видим, у овощных культур (см. рис. 1) имеет место прямая пропорциональность связи между водопотреблением и среднедекадными температурами воздуха, а у многолетних трав (см. рис. 2) – обратная пропорциональность в рассматриваемом диапазоне наблюдаемых температур. Данный факт можно объяснить направленностью влияния температуры воздуха на протекание процессов жизнедеятельности в растительном организме. Полагаем, что для овощных культур оптимум температур воздуха находится за верхней границей наблюдаемого диапазона, поэтому с ростом температуры ее комфортность для растений повышается, что обуславливает рост коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) и, соответственно, увеличение водопотребления овощных культур.

В свою очередь, у многолетних трав оптимум температур воздуха находится перед нижней границей наблюдаемого диапазона, поэтому с ростом температуры ее комфортность для растений падает, а это вызывает снижение коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) и уменьшает водопотребление многолетних трав.

Все выполненные выше расчеты водопотребления справедливы при высокой влагообеспеченности сельскохозяйственных культур, поэтому возникает вопрос: влияет ли снижение влагообеспеченности культуры на величину коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ).

Ответ на поставленный вопрос дают результаты проведенных нами полевых опытов, в которых на фоне одного уровня минерального питания присутствовали варианты без орошения и с орошением сенокоса. В табл. 2 приведена урожайность многолетних злаковых трав, полученная во втором укосе, в течение вегетации которого во все годы исследований возникала необходимость в орошении для поддержания влажности в корнеобитаемом слое почвы в заданных пределах.

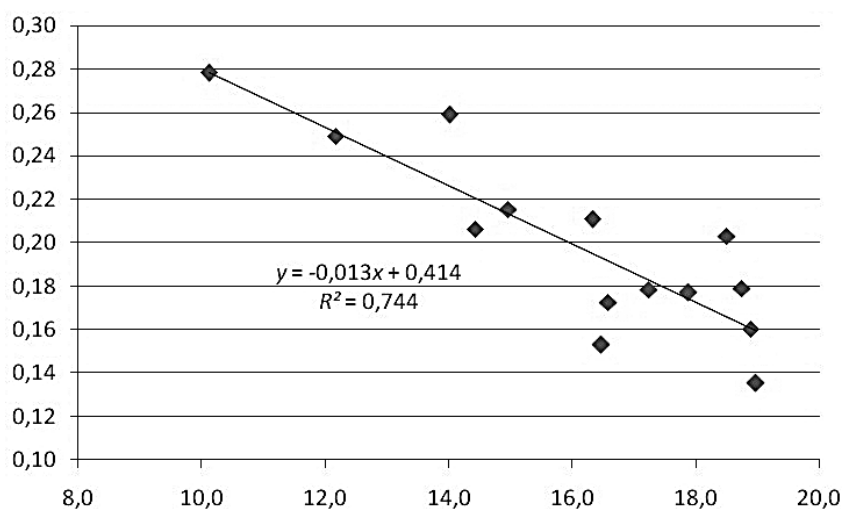


Рис. 2. Осредненная для центральной и южной гидролого-климатических зон Беларуси зависимость коэффициента пропорциональности ( $C_E$ ) от среднедекадных температур воздуха для пастбищ на минеральных почвах

Т а б л и ц а 2. Влияние увлажнения торфяных почв на урожайность 2-го укоса многолетних трав и показатели связи эвапотранспирации с температурами воздуха [1]

Показатель	1977 г.	1978 г.	1979 г.
<i>Вариант без орошения</i>			
У, ц а.с.в./га	26,5	22,1	22,4
С <sub>Е</sub> , мм/°С	0,200	0,159	0,137
К <sub>Е</sub> , мм/°С	0,67	0,53	0,46
<i>Вариант с орошением</i>			
У, ц а.с.в./га	36,0	30,9	33,6
С <sub>Е</sub> , мм/°С	0,238	0,265	0,240
К <sub>Е</sub> , мм/°С	0,79	0,88	0,80

П р и м е ч а н и е. У – урожайность второго укоса трав, ц а. с. в/га (центнеров абсолютно сухого вещества с гектара); С<sub>Е</sub> – коэффициент пропорциональности, мм/°С; К<sub>Е</sub> – показатель влаго-теплообеспеченности культуры (биотермический коэффициент), мм/°С.

Как видим, наблюдается вполне четкая закономерность: при повышении влагообеспеченности культуры коэффициенты пропорциональности (С<sub>Е</sub>) возрастают, что является следствием увеличения эвапотранспирации и ведет к повышению урожайности.

Помимо определения коэффициентов пропорциональности (С<sub>Е</sub>) отношение эвапотранспирации к сумме среднесуточных температур воздуха (1) можно использовать для характеристики влагообеспеченности растений за расчетный период. Данный вывод основан на уравнении водного баланса сельскохозяйственного поля

$$\Delta W = P - E \pm Q - V, \quad (4)$$

где ΔW – изменение запасов почвенной влаги за расчетный период, мм; P, E, Q, V – атмосферные осадки, водопотребление (эвапотранспирация), влагообмен между грунтовыми водами и корнеобитаемым слоем, поверхностный сток соответственно, мм.

Уравнение (4) можно представить в удобной для анализа форме:

$$\frac{E}{\alpha \sum T} = \frac{P}{\alpha \sum T} - \frac{\Delta W}{\alpha \sum T} \pm \frac{Q}{\alpha \sum T} - \frac{V}{\alpha \sum T}, \quad (5)$$

(α – заданный постоянный коэффициент пропорциональности в отношении рассматриваемого показателя водного режима к сумме среднесуточных температур воздуха за расчетный период (постоянная величина), мм/°С).

Константа «α» введена в уравнение (5) не случайно. Она используется для ограничения в приемлемых пределах диапазона колебаний абсолютных величин отношений, входящих в (5) и рассматриваемых в качестве основных показателей водного режима. Причем до настоящего времени величина этой константы определялась субъективными соображениями исследователей, предлагавших свои показатели для оценки водного режима растений.

Например, Г. Т. Селянинов ввел в исследовательскую практику так называемый гидротермический коэффициент (α = 0,1):

$$C_p = \frac{P}{0,1 \sum T}, \quad (6)$$

где С<sub>р</sub> – гидротермический коэффициент, мм/°С; P – сумма атмосферных осадков за расчетный период, мм; ΣT – сумма среднесуточных температур воздуха более 10 °С за расчетный период, °С.

По аналогии с Г. Т. Селяниновым эту же величину константы ( $\alpha=0,1$ ) использовали Н. Н. Семенов и И. И. Вага при анализе связи водного режима почв с урожайностью озимой тритикале с помощью относительного параметра, названного ими «показатель водного режима растений» [5]

$$C_p = \frac{\Delta W}{0,1 \Sigma T}, \quad (7)$$

где  $C_p$  – показатель водного режима растений, мм/°С;  $\Delta W$  – изменение почвенных влагозапасов в слое 0–50 см за анализируемый период;  $\Sigma T$  – сумма среднесуточных температур воздуха более 10 °С за тот же период.

Вместе с тем результаты выполненных нами исследований позволяют придать данной константе вполне реальный физический смысл. При анализе влияния водного режима почв на продуктивность растений с использованием относительных показателей, на наш взгляд, следует ориентироваться на максимальную величину коэффициента пропорциональности, которая в соответствии с представленными выше данными (см. рис. 1, 2) на минеральных почвах Беларуси достигает 0,28.

Основанием для подобного предложения являются результаты применения теории размерностей и подобия физических величин к анализу водного режима растений. В соответствии с выводами, полученными в [4], водный режим растений в полной мере характеризуется обобщающими относительными показателями: атмосферного увлажнения, почвенного увлажнения (использования растениями почвенной влаги), внутрипочвенного влагообмена и поверхностного стока. Все эти показатели соответствуют отношениям, входящим в правую часть уравнения (5), с той лишь разницей, что вместо функции суммы температур воздуха в их знаменателе стоит испаряемость [4].

Учитывая, что эвапотранспирация при оптимальном водном режиме приближается к испаряемости, но не превышает ее, на основе выполненных выше расчетов определим для испаряемости на минеральных почвах Беларуси величину коэффициента пропорциональности среднедекадным температурам воздуха несколько большую, чем полученную при расчете водопотребления, округленно  $\alpha=0,3$ , т. е.

$$E_0 = 0,3 \Sigma T \quad (8)$$

( $E_0$  – испаряемость за расчетный период, мм).

Именно данную величину константы ( $\alpha = 0,3$ ) мы считаем наиболее обоснованной и рекомендуем использовать на минеральных почвах Беларуси при оценке водного режима растений и его влиянии на урожайность сельскохозяйственных культур. В целом водный режим растений обобщенно можно характеризовать следующими показателями [4]:

$$K_P = \frac{P}{\alpha \Sigma T}, K_{\Delta W} = \frac{\Delta W}{\alpha \Sigma T}, K_Q = \frac{Q}{\alpha \Sigma T}, K_V = \frac{V}{\alpha \Sigma T}, \quad (9)$$

где  $K_P$ ,  $K_{\Delta W}$ ,  $K_Q$ ,  $K_V$  – показатели атмосферного увлажнения (синоним гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова), использования растениями почвенной влаги (синоним показателя водного режима растений Н. Н. Семенов), внутрипочвенного влагообмена и поверхностного стока соответственно.

В дополнение к названным выше отношению водопотребления (эвапотранспирации) к испаряемости можно назвать показателем влагообеспеченности растений, или биотермическим коэффициентом:

$$K_E = \frac{E}{\alpha \Sigma T} \quad (10)$$

( $K_E$  – биотермический коэффициент, мм/°С).

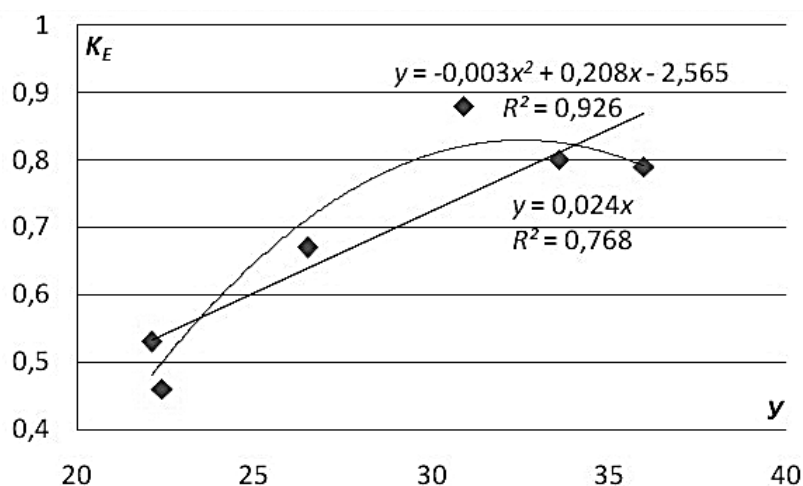


Рис. 3. Связь биотермического коэффициента с урожайностью, полученной во втором укосе многолетних злаковых трав на торфяных почвах

Таким образом, биотермический коэффициент (10) обобщенно характеризует влагообеспеченность растений, а уравнение (5) представляет собой связь между показателями водного режима растений (9), алгебраическая сумма которых равна биотермическому коэффициенту:

$$K_E = K_P - K_{\Delta W} \pm K_Q - K_V \quad (11)$$

На рис. 3 представлены данные табл. 2, в которой биотермическому коэффициенту соответствует константа  $\alpha = 0,3$ . Как видим, биотермический коэффициент ( $K_E$ ) увеличивается при повышении влагообеспеченности растений, однако его рост прекращается при достижении оптимальной для растений влажности почвы. Не вызывает сомнений, что данная закономерность, экспериментально установленная для многолетних трав, будет справедливой и для других культур.

Данные табл. 2, приведенные на рис. 3, позволяют предложить следующую качественную оценку влагообеспеченности растений на основе биотермического коэффициента (за период вегетации):

$K_E > 0,75$  – влагообеспеченность хорошая;

$K_E = 0,60-0,75$  – влагообеспеченность удовлетворительная;

$K_E = 0,45-0,60$  – влагообеспеченность пониженная;

$K_E < 0,45$  – влагообеспеченность критическая, приводящая к значительным потерям продуктивности.

На рис. 3 три верхние точки соответствуют варианту с орошением многолетних трав (влагообеспеченность хорошая), средняя точка характеризует удовлетворительную влагообеспеченность на неорошаемом варианте в средневлажном 1977 г., а две нижние точки соответствуют пониженной влагообеспеченности на этом варианте в среднесухих 1978 и 1979 гг. (см. табл. 2).

**Заключение.** Установленные по показаниям 42 метеостанций Беларуси за 30-летний период (1980–2009 гг.) статистические характеристики связи эвапотранспирации растений с испаряющей способностью атмосферы указывают на то, что водопотребление отзывчивых на орошение многолетних трав и овощных культур (капусты поздней, свеклы столовой, моркови), вычисленное по дефицитам влажности воздуха, коррелирует с температурами воздуха. Причем теснота данной связи для всех культур повышается при перемещении от северной к центральной и далее к южной гидролого-климатической зоне Беларуси, что связано с тенденцией повышения актуальности орошения.

Для обобщенной оценки влаготеплообеспеченности растений предложено использовать биотермический коэффициент, равный отношению эвапотранспирации к испаряемости, выраженной через сумму среднесуточных температур воздуха. Показано, что данный коэффициент равен алгебраической сумме относительных показателей водного режима растений, включая широко

известный гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова и так называемый «показатель водного режима растений», недавно введенный в опытную практику Н. Н. Семененко. Биотермический коэффициент обобщенно характеризует влаготеплообеспеченность растений в любых условиях (как при наличии орошения, так и при его отсутствии), поэтому на основе биотермического коэффициента предложена соответствующая классификация водных режимов сельскохозяйственных культур.

### Литература

1. *Лихацевич, А. П.* Расчет испарения с орошаемых сенокосов на торфяных почвах Белорусского Полесья / А. И. Михальцевич, А. П. Лихацевич // Регулирование водного режима торфяных почв: сб. науч. тр. БелНИИМирВХ. – Минск, 1981. – С. 100–107.
2. Оценка изменения засушливости вегетационных периодов на территории Беларуси / А. П. Лихацевич [и др.] // Мелиорация. – 2011. – № 2 (66). – С. 67–74.
3. Оросительные системы. Нормы проектирования: ТКП 45–3.04–178–2009 (02250) . – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.
4. *Лихацевич, А. П.* Основы оценки водных режимов почв / А. П. Лихацевич // Мелиорация. – 2010. – № 1 (63). – С. 15–23.
5. *Семененко Н. Н.* Влияние гидротермических условий роста и развития на урожайность озимого тритикале / Н. Н. Семененко, И. И. Вага // Мелиорация. – 2011. – № 2 (66). – С. 137–144.

*A. P. LIKHATSEVICH, A. V. VAGA*

### INFLUENCE OF AIR TEMPERATURE ON WATER CONSUMPTION OF CROPS

#### Summary

The parameters of empirical formulae to calculate water consumption of vegetable crops (late cabbage, table beet, carrot) and perennial grasses according to the average decade temperatures of air are determined. The tendency of increase of closeness of relations of crops water consumption with air temperatures when they move from the north of Belarus to the south is established. For estimation of water supply in plants it's suggested using biothermal coefficient equal to the algebraic sum of familiar indices of plants water mode.