

УДК 551.573:631.67

**А. А. Черемисинов, А. Ю. Черемисинов**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,  
Воронеж, Российская Федерация

## **ОБЗОР РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ ОРОШАЕМЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ**

В результате анализа исследований расчетных методов определения суммарного испарения, проводившихся в различных регионах мира, установлено, что разработка моделей суммарного испарения широко распространена в большинстве развитых стран. В России, имеющей значительное почвенно-климатическое разнообразие, для большинства регионов разными научно-исследовательскими организациями разработаны свои методы определения суммарного испарения. На севере России это методы С. И. Харченко и А. Р. Константинова, на юге – методы Г. К. Льгова, С. П. Невского и Д. А. Штойко, особенно для регионов с орошаемым земледелием, в Сибири – метод В. С. Мезенцева, в центральной части России широко используют методы Н. Н. Иванова с поправкой Молчанова и биоклиматический метод А. М. Алпатьева. В последние десятилетия XX в. биоклиматический метод распространялся по всей стране, но трудоемкость определения биоклиматических коэффициентов ограничила его применение. За рубежом широко распространен метод Пенмана – Монтейта. ФАО ООН рекомендовала его как стандартный. Практически все расчетные методы имеют в основе климатические показатели. Основными из них являются радиационный баланс за период вегетации фитоценоза, суммы средних суточных дефицитов влажности воздуха и температуры воздуха за тот же период, скорость ветра. Такие методы расчета имеют простые модели и могут легко и своевременно использоваться как в оперативных, так и в прогнозных расчетах. Погрешности расчета будут находиться в допустимых пределах при использовании методов в условиях, идентичных тем, для которых они разработаны. Но в силу региональности для конкретной территории выбранный метод необходимо уточнять, вводя поправочные коэффициенты, учитывающие особенности рельефа, технологии орошения, сельскохозяйственных культур и т. д.

Ключевые слова: суммарное испарение, водопотребление сельскохозяйственных культур, расчетные методы, модели эвапотранспирации.

**A. A. Cheremisinov, A. Yu. Cheremisinov**

Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great, Voronezh,  
Russian Federation

## **REVIEW OF CALCULATING METHODS FOR EVAPOTRANSPIRATION OF IRRIGATED FIELDS**

As a result of the research analysis of calculation methods for determining evapotranspiration carried out in different regions of the world it was established that the development of the models for evapotranspiration had been widely spread in the most of the developed countries. In Russia, which has a considerable diversity of soil-climatic conditions, for the most regions the own methods for evapotranspiration were developed by different research organizations. In the North of Russia such methods were developed by S. I. Kharchenko and A. R. Konstantinov, in the South – by G. K. Lgov, S. P. Nevskiy and D. A. Shtoyko, especial-

ly for irrigation regions, in Siberia – by V. S. Mezentsev, in central part of Russia is widely used the methods of N. N. Ivanov with the adjustment of Molchanov and bioclimatic method of A. M. Alpatyev. In recent decades of the XX century the bioclimatic method has been spread through the whole country, but the laboriousness while bioclimatic coefficients determining has limited its application. The Penman Monteith method is widely spread abroad. FAO recommended using this method as the reference one. Actually, all calculation methods base on climatic indices. The main indices are radiation balance during the growing season of phytocenosis, sum of mean daily air humidity deficit and air temperature for the same period, and wind speed. Such methods have simple models and can be easily and timely used for either operative calculation or predictive ones. Calculating errors will be within acceptable limits by using the methods in conditions identical to those for which they were designed. But due to regionality, the chosen method should be adjusted for the particular territory by using correcting coefficients taking into account topographic features, irrigation technology, the crop and so on.

Keywords: evapotranspiration, crop water consumption, calculating methods, model for evapotranspiration.

Важнейшей характеристикой в гидромелиорации является величина суммарного испарения [1–35]. Некоторые исследователи в своих работах называют его водопотреблением, а за рубежом – эвапотранспирацией (evapotranspiration) [4, 8, 13, 25, 27–35]. Суммарное испарение оказывает серьезное влияние на технологии режимов орошения, а через них и на урожайность культур, планирование водных ресурсов и управление водными балансами агроландшафтов. Его величина вместе с осадками является входной информацией для большинства гидрологических и воднобалансовых моделей.

Суммарное испарение  $E$  расходуется на транспирацию растением  $E_T$  и испарение почвой  $E_{II}$ :

$$E = E_T + E_{II}.$$

Определить доли транспирации  $E_T$  и испарения с почвы  $E_{II}$  в водопотреблении сложно, поэтому их обычно определяют как единое целое [1, 3, 7, 9, 10].

В нашей стране суммарное испарение, методы его определения для сельскохозяйственных полей изучали и изучают такие ученые, как А. М. и С. М. Алпатьевы, С. Н. Вериги, Р. Э. Давид, Н. В. Данильченко, П. И. Колосков, А. Р. Константинов, А. Н. Костяков, И. П. Кружилин,

Г. К. Льгов, В. С. Мезенцев, В. П. Остапчик, А. А. Роде, Г. Т. Селянинов, С. И. Харченко, А. Ю. Черемисинов, И. А. Шаров, Д. И. Шашко, Д. А. Штойко и другие. За рубежом: в Болгарии – Д. Велев, Г. Марков, И. Делибалтов, Х. Христов, И. Цонев; в Польше – К. Матуль; в Англии – Penman, Monteith, Shuttleworth и Wallace; во Франции – L. Turc; в США – Blaney, Criddle, Hargreaves и Allen; в Австралии – J. A. Prescott и другие.

S. Lawrence Dingman [8] пишет: «Испарение – это диффузионный процесс, который можно рассматривать как функции давления пара, дефицита влажности воздуха и скорости ветра». Он считает, что данный процесс сопровождается тепловыми потерями от поверхности испарения в виде скрытой теплоты, которая может быть скомпенсирована теплообменом или теплопередачей изнутри испаряемого тела на поверхность.

Транспирация – это испарение воды из сосудистой системы растений в атмосферу в результате процесса фотосинтеза [9]. Она ограничена тепловой энергией, наличием воды, влажностью, температурой, концентрацией  $\text{CO}_2$  в окружающей среде и скоростью ветра. Виды растений по-разному влияют на транспирацию за счет воздействия на листовую проводимость и адаптации растений к наличию воды [8].

По мнению А. М. Алпатьева, А. Р. Константинова, М. И. Будыко, суммарное испарение культур находится в прямой зависимости от климатических, почвенных, гидрогеологических и хозяйственных условий, биологических особенностей культуры, ее урожайности, способа полива и играет важную роль в формировании водного баланса поля, являясь основной расходной статьей баланса [1, 3, 7, 11]. Наряду с биологическими свойствами сельскохозяйственных культур оно определяет потребные запасы воды в почве и, следовательно, необходимость в орошении [6, 12].

Испарение с поверхности почвы зависит от свойств самой почвы и метеорологических условий внешней среды, а транспирация обуславливается взаимным влиянием внешних и внутренних факторов растений,

а также метеорологическими условиями [1, 3, 4, 11, 12].

Все имеющиеся методы определения суммарного испарения делятся на методы непосредственных полевых измерений, расчетные методы и эмпирические зависимости [1, 4, 11–13].

Многие исследователи отмечали большую трудоемкость методов прямого измерения суммарного испарения. Необходимость изучения изменчивости данного процесса во времени и по площади привела к созданию целого ряда расчетных методов для определения суммарного испарения, основанных на эмпирических моделях – уравнениях связи [1, 7, 12].

По своему содержанию выделяют физически обоснованные и эмпирические модели. Эмпирические модели предполагают меньшее количество входных переменных, они разработаны с целью упрощения расчета.

Рассмотрим некоторые методы определения и основные эмпирические модели суммарного испарения, наиболее распространенные в России и за рубежом.

Метод теплового баланса основан на использовании уравнений теплового баланса поверхности земли с учетом тепло- и водообмена в приземном слое воздуха:

$$E = (R - B - P') / L,$$

где  $E$  – испарение, мм;

$R$  – радиационный баланс, ккал/см<sup>2</sup>;

$B$  – количество тепла, идущее на нагревание почвы, ккал/см<sup>2</sup>;

$P'$  – турбулентный поток тепла, ккал/см<sup>2</sup>;

$L$  – скрытая теплота испарения, кал/г.

Этот метод позволяет получать величины за короткие отрезки времени и в сочетании с методом водного баланса удобен для изучения суммарного испарения. Метод теплового баланса в России принимают за эталонный [7, 12].

Метод водного баланса основан на уравнении водного баланса поля:

$$E = \alpha P + M + \Delta W + W_{\text{гр}} + W_{\text{сб}},$$

где  $E$  – суммарное водопотребление, мм;

$\alpha P$  – осадки, используемые растением за вегетационный период, мм;

$\alpha$  – коэффициент, показывающий долю осадков, используемых растением;

$P$  – естественные осадки, выпадающие за вегетационный период, мм;

$M$  – оросительная норма, мм;

$\Delta W$  – количество воды, используемое растением из корнеобитаемого слоя почвы, мм:

$$\Delta W = W_{\text{н}} - W_{\text{к}},$$

где  $W_{\text{н}}$  и  $W_{\text{к}}$  – запас воды в корнеобитаемом слое соответственно в начале и конце вегетационного периода, мм;

$W_{\text{гр}}$  – подпитывание корнеобитаемого слоя почвы грунтовыми водами, мм;

$W_{\text{сб}}$  – потери оросительной воды на поверхностный и глубинный сброс, мм.

Он дает достаточно надежные данные и применяется в случае глубокого залегания уровня грунтовых вод (5–10 м). Тогда при определении суммарного испарения и оросительной нормы влагообменом между грунтовыми и почвенными водами можно пренебречь. Этим методом можно вычислять декадное и месячное суммарное испарение растений для однородных почв с погрешностью 10–12 %, а для неоднородных – около 15 % [1, 3, 7]. Недостаток этого метода заключается в его трудоемкости и неоперативности. Он дает лишь осредненную величину суммарного испарения, не выявляя его зависимости от других факторов [9].

Эмпирические методы основаны на установлении корреляционных зависимостей между испарением и одним или группой метеорологических показателей.

А. Н. Костяков [14] впервые предложил формулу для определения суммарного водопотребления, нашедшую широкое применение:

$$E = K_b \times Y,$$

где  $E$  – суммарное водопотребление, м<sup>3</sup>/га;

$K_b$  – коэффициент потребления воды на единицу урожайности, м<sup>3</sup>/т;

$Y$  – расчетная урожайность сельскохозяйственных культур, т/га.

Ее достоинством является учет влияния урожая на расход воды с поля, однако она предполагает однородные почвенно-геологические, климатические и агротехнические условия на всей территории, конкретный сорт культуры. Уравнения такого вида применимы для локальных условий при постоянстве на всей мелиорируемой площади уровня плодородия почвы и метеорологических условий из года в год, что практически невозможно. Поэтому коэффициенты  $K_b$  колеблются по годам в пределах даже одного географического района, что отмечено Г. К. Львовым [15]. Другим недостатком этого метода является получение суммарного испарения за весь период вегетации, а не за отдельные промежутки времени [16].

И. А. Шаров [17] предложил метод определения испарения в зависимости от температуры воздуха:

$$E = e \times \Sigma t + 4 \times a,$$

где  $E$  – суммарное испарение, м<sup>3</sup>/га;

$e$  – модуль испарения, м<sup>3</sup>/(га·°С);

$\Sigma t$  – сумма среднесуточных температур воздуха в течение вегетационного периода, °С;

$a$  – число дней вегетационного периода.

Недостатком этой формулы, по мнению В. С. Мезенцева [12], является постоянство модуля  $e$ , которое не отражает его зависимости от влажности почвы, режима орошения, техники полива и других условий. Этот метод позволяет определять суммарное испарение за любой отрезок времени.

Широкое распространение при расчете суммарного испарения в зоне недостаточного увлажнения получила зависимость, предложенная Н. Н. Ивановым [18]:

$$E_0 = 0,0018 \times (100 - f) \times (25 + t)^2 \times 0,8,$$

где  $E_0$  – испаряемость за месяц, мм;

$f$  – среднемесячная относительная влажность воздуха, %;

$t$  – среднемесячная температура воздуха, °С.

Формула получена при работе с испарителями, поэтому для применения ее в полевых условиях Л. А. Молчановым введена поправка 0,8 [19]. Но она вряд ли сможет увязать испаряемость с водной поверхностью с испарением с сельскохозяйственного поля. Она сугубо региональна и совершенно не учитывает специфику испарения с сельскохозяйственных полей. На эти недостатки указывали В. С. Мезенцев [12] и А. Р. Константинов [7].

Некоторые авторы используют эту формулу для определения суммарного испарения, вводя коэффициент перехода от испаряемости к испарению [3, 9, 19]. Однако непосредственное определение суммарного испарения было бы более точным, чем полученное через испаряемость.

Д. А. Штойко [20] предложил биофизический метод расчета суммарного испарения, который включает расчеты по двум зависимостям:

- суммарное испарение до полного затенения поверхности почвы растениями и в период их созревания (с начала массового пожелтения листьев) рассчитывают по формуле:

$$E = \Sigma t \times (0,1 \times t - f/100),$$

где  $E$  – суммарное испарение, м<sup>3</sup>/га;

$\Sigma t$  – сумма среднесуточных температур воздуха в течение вегетационного периода, °С;

$t$  – среднемесячная температура воздуха, °С;

$f$  – среднемесячная относительная влажность воздуха, %;

- в период наиболее активного водопотребления со времени затенения поверхности почвы растениями и до начала их созревания пользуются формулой (обозначения те же, что и в предыдущей формуле):

$$E = \Sigma t \times (0,1 \times t - (1 - f) / 100).$$

По данным А. Ю. Черемисинова [16], этот метод дает удовлетворительные результаты при определении суммарного испарения. Недостатками его являются применение двух формул, скачкообразный переход от одной к другой, отсутствие учета биологических особенностей орошаемых культур.

В условиях Северного Кавказа Г. К. Льгов [15], основываясь на многолетних наблюдениях за суммарным испарением, получил эмпирическую формулу:

$$E = 1,88 \times \Sigma t,$$

где  $E$  – суммарное испарение за расчетный период, мм;

$\Sigma t$  – сумма среднемесячных температур воздуха за расчетный период, °С.

Недостатком ее также является игнорирование биологических особенностей орошаемых культур.

Широкое распространение нашел биоклиматический метод расчета суммарного испарения по дефицитам влажности воздуха, предложенный А. М. Алпатьевым [1] и получивший дальнейшее развитие в работе С. М. Алпатьева [21]:

$$E = K_{\phi} \times \Sigma d,$$

где  $E$  – суммарное водопотребление, мм;

$K_{\phi}$  – коэффициенты биологической кривой растения, мм/мбар;

$\Sigma d$  – сумма дефицитов влажности воздуха за расчетный период, мбар.

Для орошаемых районов рекомендуют постоянные декадные значения  $K_{\phi}$ , пользуясь которыми, можно определить  $E$  при условии оптимального увлажнения расчетного слоя почвы.

Многие авторы, такие как И. Н. Ильинская, А. Н. Кабанов, А. Р. Константинов, А. М. Олейник, Д. Б. Циприс, А. Ю. Черемисинов и другие, указывают на существенный недостаток этого метода – изменчивость во времени и пространстве коэффициента  $K_{\sigma}$ . На него влияют многие факторы, в частности погодные условия и место его применения [7, 22, 23].

По данным А. М. Алпатьева, расчетная точность определения величины суммарного испарения составляет  $\pm 10\text{--}15\%$  при наличии региональных коэффициентов  $K_{\sigma}$ . Преимущества этого метода: простота и доступность расчетов, исходные данные могут быть взяты на любой репрезентативной метеорологической станции [22].

А. Р. Константинов [7] рекомендует определять суммарное испарение также по биологическим кривым, несколько отличным от кривых А. М. и С. М. Алпатьевых:

$$E = E_w \times E_{0i} / E_0,$$

где  $E$  – суммарное испарение за расчетный период при оптимальном увлажнении почвы, мм;

$E_w$  – ординаты биологических кривых растений;

$E_{0i}$  – испарение за расчетный интервал времени, значение которого определяется по температуре и абсолютной влажности воздуха по графикам А. Р. Константинова, мм;

$E_0$  – средний сезонный ход условной испаряемости, мм.

Методика дает удовлетворительные результаты, но расчет очень трудоемок, длителен, необходимо пользоваться четырьмя таблицами и тремя графиками [16].

С. П. Невским получена эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитывать суммарное испарение по температуре, влажности воздуха и скорости ветра [23]:

$$E = 0,869 \times K \times (d \times t \times V)^{0,265},$$

где  $E$  – суммарное испарение за расчетный период, мм;

$K$  – поправочный коэффициент, учитывающий местоположение метеостанции;

$d$  – дефицит влажности воздуха за расчетный период, мбар;

$t$  – среднесуточная температура воздуха, °С;

$V$  – среднесуточная скорость воздуха, м/с.

Проверка, выполненная в различных регионах страны, дала удовлетворительные результаты. Других данных о применимости этого метода нет.

Для условий Западной Сибири В. С. Мезенцевым [12] предложен метод гидроклиматических расчетов (ГКР). Суммарное испарение вычисляется по уравнению связи водного и теплоэнергетического балансов. В. С. Мезенцев и другие [12] считают, что суммарная потребность в воде фитоценоза в пределе равна испаряемости, что доказано на многих культурных фитоценозах, а в последние годы и на естественных фитоценозах:

$$z = z_m \times \left( 1 - \left( \frac{KX + W_1 - W_2}{z_m} \right)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где  $z_m$  – максимально возможное испарение, мм;

$KX$  – осадки за расчетный период, мм;

$W_1$  и  $W_2$  – запас воды в корнеобитаемом слое соответственно в начале и конце вегетационного периода, мм;

$n$  – параметр, учитывающий форму рельефа.

На практике эту потребность легко рассчитать, если знать испаряемость за период от начала до конца вегетации изучаемого сообщества. Использование уравнения теплового баланса для расчетов потребности в воде фитоценозов не может встречать каких-либо возражений принципиального характера, если влажность почвы в течение периода вегетации данного фитоценоза поддерживается на оптимальном уровне (для суглинистых почв –

от 65 до 100 % наименьшей влагоемкости почвы) и если растительная масса фитоценоза соответствует достаточно высоким урожаям, способным полностью исчерпать теплоэнергетические ресурсы данного географического пункта в текущем году. Недостатками этого метода являются региональность и трудоемкость.

Метод С. И. Харченко [24] включает две зависимости, которые используются при различных почвенных условиях, отражаемых параметром  $\gamma$ . Метод позволяет определять величину суммарного испарения по декадам и фазам развития растений:

$$E = \frac{\beta \times R_0}{0,12 \times \gamma} (W_n + W_k) \text{ при } \frac{(W_n + W_k)}{2} < \gamma,$$

$$E = 16,7 \times \beta \times R_0 \text{ при } \frac{(W_n + W_k)}{2} > \gamma,$$

где  $E$  – суммарное водопотребление, мм/месяц;

$\beta$  – параметр, определяемый опытным путем и зависящий от температуры воздуха;

$R_0$  – радиационный баланс орошаемого поля, Дж/(см<sup>2</sup>·месяц);

$\gamma$  – параметр, учитывающий влагоемкость почвы, мм;

$W_n$  и  $W_k$  – продуктивные влагозапасы в начале и конце расчетного периода в метровом слое почвы, мм.

Расчеты проводят при наличии измерений продуктивных влагозапасов. Широкого распространения этот метод не получил в связи с трудностью определения параметров  $\beta$  и  $\gamma$ .

Н. Л. Пенман (Пенманом) [25, 26] был предложен метод, основанный на уравнении теплового баланса водоема. Суммарное испарение определяется по формуле:

$$E = \frac{mR_n + \rho_a \times c_p \times \Delta e \times q_a}{\lambda_v \times (m + \gamma)},$$

где  $E$  – суммарное испарение, мм/месяц;

$m$  – наклон кривой насыщения давления паров, Па/К;

$R_n$  – освещенность, Вт/м<sup>2</sup>;

$\rho_a$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

$\Delta e$  – дефицит давления паров, Па;

$q_a$  – импульс аэродинамической поверхностной проводимости, м/с;

$\lambda_v$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

$\gamma$  – психрометрическая постоянная, Па/К.

Позже эта модель испарения была дополнена Monteith для учета растительности и создаваемого ею аэродинамического сопротивления [27]:

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a \times c_p \times \Delta e \times q_a}{(\Delta + \gamma(1 + q_a/q_s)) \times \lambda_v},$$

где  $ET_0$  – суммарное испарение, мм/сут;

$\Delta$  – скорость изменения насыщения удельной влажности с температурой воздуха, Па/К;

$G$  – плотность почвенного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_s$  – скорость испарения водных масс, г·с/м<sup>2</sup>;

остальные обозначения как в предыдущей формуле.

Модифицированная модель Penman – Monteith (сокращенно РМ), по данным Jensen, Doorenbos, Pruitt, Allen и других, после полевой проверки в США показала лучшие результаты из 20 других методов, основанных на регрессионном анализе [28–30].

Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) рекомендовала модель РМ принять в качестве стандартного метода для оценки потенциальной эвапотранспирации эталонной поверхности (например, травы). Эта модель известна как FAO-56 [31, 32].

Американское общество гражданских инженеров (R. G. Allen,

R. D. Burman, M. E. Jensen) рекомендовало эту, как считается, общепринятую методику расчета потенциальной эвапотранспирации для автоматизированных расчетов АСУП-ПМ [32].

К достоинствам модели РМ следует отнести использование в расчетах испаряемости многих переменных метеорологических данных, в том числе общей солнечной радиации, альбедо, фактической и возможной продолжительности солнечного сияния. Однако необходимость использовать большое количество метеорологических данных для расчетов  $E_0$  ограничивает применение этого метода, так как далеко не на всех метеорологических станциях проводятся все необходимые для расчета наблюдения. Кроме того, в различных географических зонах отношение «возможной транспирации» к испарению со свободной водной поверхности не остается постоянным, что было показано В. П. Остапчиком [22].

Вместе с тем Jensen, Doorenbos, Allen отмечали, что модель FAO-56 не может быть распространена как глобальная [28–30]. По их мнению, модель особенно чувствительна к скорости испарения в зависимости от уровня влажности и равномерности распределения растительной поверхности при условии неограниченного водоснабжения.

В США широко признаны также расчетные модели Thornthwaite (С. В. Торнтвейта), H. Blaney, V. Criddle (Х. Блени – В. Криддла).

Формула С. В. Торнтвейта (17) получена по данным специальных опытов на водосборах [33]:

$$E_{\Phi} = 16 \times \left( \frac{10 \times t}{I} \right)^g,$$

где  $E_{\Phi}$  – суммарное испарение фитоценоза (суммарное потенциальное испарение) в мм за 30 дней, мм;

$t$  – среднемесячная температура воздуха, °С;

$I$  – теплобалансовый индекс, представляющий собой сумму 12 месячных показателей;

$g$  – кубическая функция  $I$ .

После проверки формулы на практике С. В. Торнтвейт отмечал, что у него нет уверенности в возможности ее использования в климатических условиях, отличных от условий территории, для которой она выведена.

Тип фитоценоза в формуле С. В. Торнтвейта не учитывается, что ограничивает возможность ее использования для расчетов испарения за короткие периоды времени – межфазные периоды или пентады и декады. К числу слабых мест формулы С. В. Торнтвейта следует отнести недоучет воздействия на испарение влажности воздуха.

Исследования Гипроводхоза в Российской Федерации подтвердили ограниченность применения формулы С. В. Торнтвейта [22]. Однако в США и Канаде рассматриваемый метод дает удовлетворительные результаты.

Метод Н. Blaney – В. Criddle (Х. Блени – В. Криддла) [34] основан на следующей формуле:

$$E = 25,4 \times \frac{KP \times (1,8 \times t + 32)}{100},$$

где  $E$  – суммарная месячная потребность в воде фитоценоза, мм;

$K$  – константа, зависящая от типа растительного покрова;

$P$  – продолжительность часов дневного времени в долях от годовой их суммы, %;

$t$  – среднемесячная температура воздуха, °С.

Достоинством данного метода является дифференцированное по культурам значение коэффициента  $K$ . Однако в регионах, отличных от места получения по природным условиям, он дает завышенные величины суммарного испарения. С. И. Харченко показал его непригодность для степей Русской равнины [24]. Кроме того, в упрощенной формуле не учтено влияние влажности воздуха на испарение.

Во Франции и ряде других стран широкое признание получил метод

L. Turc (Л. Тюрка) [35], разработанный на основе многочисленных наблюдений на водосборах:

$$E_{\Phi} = 0,13 \frac{t}{t+15} (i+50),$$

где  $E_{\Phi}$  – потребность в воде за декаду, мм;

$t$  – средняя за декаду температура воздуха, °С;

$i$  – средний за декаду приток коротковолновой радиации, кал/(см<sup>2</sup>·день).

Основная трудоемкость его применения состоит в том, что для многих районов значения  $i$  в формуле неизвестны.

Кроме рассмотренных методов существует ряд других, мало употребляемых и недостаточно разработанных расчетных зависимостей.

Как показывает анализ различных авторов (А. М. Алпатьева, Д. А. Штойко, В. П. Остапчика, Д. Б. Циприса, С. И. Харченко и других [1, 20, 22–24]), ни один из рассмотренных выше методов не может считаться универсальным и создать такой метод расчета суммарного испарения в настоящее время не представляется возможным. Каждый из них пригоден лишь для конкретных природно-хозяйственных условий зон, для которых получены эмпирические коэффициенты, входящие в эти зависимости, или сами зависимости.

Поэтому при выборе расчетного метода для конкретных условий необходимо использовать свои эмпирические коэффициенты в наиболее общих и сходных по условиям методах или выводить собственный расчетный метод для конкретных условий. При окончательном выборе метода определения суммарного испарения необходимо учитывать простоту его использования и наличие исходных данных для расчета.

Обобщая обзор методов определения суммарного испарения орошаемых фитоценозов (водопотребления, эвапотранспирации), следует отметить, что различные метеорологические показатели достаточно хорошо описывают физический процесс испарения. Наиболее часто в зависимостях

используются следующие показатели:

$$E_{\phi} = kf(R, t, d, V),$$

где  $E_{\phi}$  – суммарная потребность в воде фитоценоза;

$k$  – средний за период вегетации эмпирический коэффициент;

$f(R, t, d, V)$  – функция радиационного баланса  $R$ , температуры воздуха  $t$ , дефицита влажности воздуха  $d$ , скорости ветра  $V$  за период вегетации конкретного фитоценоза.

Литературные данные по проверкам авторами эмпирических моделей, основанных на связи испарения и метеопараметров, показывают, что расчет можно выполнить с достаточной точностью (порядка  $\pm 10$ – $15$  %). В то же время большинство авторов указывают, что такая точность возможна в определенных условиях: расчет потребности в воде был выполнен для фитоценозов высокой продуктивности; расчеты относятся к территориям, расположенным не выше 300–400 м над уровнем океана в умеренном поясе. А. М. Алпатьев [1] показал заметное изменение суммарного испарения на северных и южных склонах разной крутизны. Отношение испаряемости на склонах к испаряемости на ровном месте на европейской территории страны оказалось равным 0,91–0,95 на северных склонах и 1,03–1,05 на южных (при крутизне склона  $5^{\circ}$ ), 0,84–0,88 на северных и 1,07–1,10 на южных (при крутизне склона  $10^{\circ}$ ).

### **Выводы**

1 Обзор даже небольшого количества различных методов определения суммарного испарения показывает постоянный интерес исследователей во всем мире к этой статье водного баланса.

2 Получившие широкое распространение эмпирические методы расчета суммарного водопотребления базируются на высокой корреляции с метеорологическими параметрами. Учет растительной поверхности поля повышает точность расчетов суммарного водопотребления.

3 При практическом применении расчетных методов для какой-либо

территории следует выбирать из возможных эмпирические методы, базирующиеся на метеопараметрах, которые наиболее значимо коррелируют с суммарным испарением в данных условиях и которые легко измерить.

### Список литературы

- 1 Алпатьев, А. М. Влагообороты в природе и их преобразования / А. М. Алпатьев. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 323 с.
- 2 Щедрин, В. Н. Стратегия использования орошаемых земель в современных условиях / В. Н. Щедрин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2003. – № 3. – С. 45.
- 3 Черемисинов, А. Ю. Динамика климата, водных балансов и ресурсов Центрального Черноземья: моногр. / А. Ю. Черемисинов, В. Н. Жердев, А. А. Черемисинов. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2013. – 326 с.
- 4 Simplified Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in California / R. L. Snyder, M. Orang, S. Matyas, M. E. Grismer // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2005, May/June. – P. 249–253.
- 5 Щедрин, В. Н. Особенности водопотребления овощных культур по периодам вегетации при орошении / В. Н. Щедрин, В. А. Кулыгин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2011. – № 2. – С. 28–31.
- 6 Григоров, М. С. Необходимы новые подходы к орошению черноземов / М. С. Григоров, А. Ю. Черемисинов // Земледелие. – 2001. – № 10. – С. 35.
- 7 Константинов, А. Р. Нормирование орошения: методы, их оценка, пути уточнения / А. Р. Константинов, Э. А. Струнников // Гидротехника и мелиорация. – 1986. – № 1. – С. 19–28.
- 8 Dingman, S. Lawrence. Physical Hydrology / S. Lawrence Dingman. – 2nd ed. – NJ, USA: Prentice Hall, 2002. – 646 p.
- 9 Метеорология и климатология: учеб. пособие / А. Ю. Черемисинов, В. Д. Попело, И. П. Землянухин, Н. М. Круглов. – Воронеж, 2010. – 233 с.
- 10 Черемисинов, А. Ю. Мелиорация: учеб. пособие / А. Ю. Черемисинов, С. П. Бурлакин, А. А. Черемисинов. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2012. – 243 с.
- 11 Будыко, М. И. Климат и жизнь / М. И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 472 с.
- 12 Мезенцев, В. С. Увлажненность Западно-Сибирской равнины / В. С. Мезенцев, И. В. Карнацевич. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 168 с.
- 13 ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation / I. Walter [et al.] // Watershed Management and Operations Management 2000. – 2001. – P. 1–11. – DOI: 10.1061/40499(2000)126.
- 14 Костяков, А. Н. Основы мелиорации: учеб. пособие / А. Н. Костяков. – 3-е изд., испр. и доп. – М.; Л.: Гос. изд-во колхоз. и совхоз. лит., 1933. – 887 с.
- 15 Льгов, Г. К. Орошаемое земледелие / Г. К. Льгов. – М.: Колос, 1979. – 191 с.
- 16 Водопотребление и качество воды при орошении сельскохозяйственных культур / А. Ю. Черемисинов, С. П. Бурлакин, И. П. Землянухин, А. А. Черемисинов, С. А. Плотников // Агроэкологический вестник: сборник. – Воронеж: Воронеж. ГАУ, 2012. – С. 53–58.
- 17 Шаров, И. А. Эксплуатация гидромелиоративных систем / И. А. Шаров. – М.: Сельхозгиз, 1959. – 448 с.
- 18 Иванов, Н. Н. Об определении величин испаряемости / Н. Н. Иванов // Известия ВГО. – 1954. – Т. 86, № 2. – С. 189–196.
- 19 Молчанов, А. А. Суммарное испарение и транспирация в лесу и на безлесных

площадях / А. А. Молчанов // Лес и воды: сборник. – М.: Географгиз, 1963. – С. 55–76.

20 Штойко, Д. А. Нормативы проектирования режимов орошения сельскохозяйственных культур и гидромодуля в условиях интенсивного использования орошаемых земель / Д. А. Штойко // Орошаемое земледелие в ЕЧ СССР. – М.: Колос, 1965. – С. 171–185.

21 Алпатьев, С. М. Методика расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур на основе биоклиматического метода для Европейской части СССР с применением ЭВМ / С. М. Алпатьев. – Киев: ММВХ СССР, 1973. – 9 с.

22 Остапчик, В. П. Информационно-советующая система управления орошением / В. П. Остапчик. – Киев: Урожай, 1989. – 248 с.

23 Циприс, Д. Б. Расчет водопотребления по метеопараметрам / Д. Б. Циприс, Э. Г. Евтушенко // Гидротехника и мелиорация. – 1980. – № 9. – С. 40–42.

24 Харченко, С. И. Гидрология орошаемых земель / С. И. Харченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 375 с.

25 Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass / H. L. Penman // Proc. R. Soc., London (A). – 1948. – Vol. 193. – P. 120–145.

26 Пенман, Х. Л. Растение и влага / Х. Л. Пенман: [пер. с англ.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 161 с.

27 Monteith, J. L. Evaporation and Environment / J. L. Monteith // 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. – Cambridge: University Press, 1965. – Vol. 19. – P. 205–234.

28 Jensen, M. E. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements / M. E. Jensen, R. D. Burman; edited by R. G. Allen; Am. Soc. Civil Engrs. – N. Y., 1990. – 360 p. – (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, No. 70).

29 Doorenbos, J. Yield response to water / J. Doorenbos, A. H. Kassam. – Rome (Italy): FAO, 1979. – 193 p. – (Irrig. and Drain. Paper (FAO), No. 33).

30 Chapter 4. Evaporation and Transpiration / R. G. Allen [et al.] // ASCE Handbook of Hydrology. – N. Y., 1996. – P. 125–252.

31 Allen, R. G. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. / R. G. Allen. – Div., Rome, 1992. – 50 p.

32 Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia / F. H. S. Chiew, N. N. Kamadalasa, H. M. Malano, T. A. McMahon // Agric. Water Management. – 1995. – Vol. 28. – P. 9–21.

33 Thornthwaite, C. W. The water balance / C. W. Thornthwaite, J. R. Mather. – 1955. – Ibid. 8. – P. 104.

34 Blaney, H. F. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data / H. F. Blaney, W. D. Criddle; USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96. – 1950. – 44 p.

35 Turc, L. Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula / L. Turc // Annales Agronomiques. – 1961. – 12. – P. 13–49.

## References

1 Alpatyev A.M., 1969. *Vlagooboroty v prirode i ikh preobrazovaniya* [Hydrologic Cycle in Nature and its Transformation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 323 p. (In Russian).

2 Shchedrin V.N., 2003. *Strategiya ispolzovaniya oroshayemykh zemel v sovremennykh usloviyakh* [The strategy of using irrigated lands in modern conditions]. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo*, no 3, 45 p. (In Russian).

3 Cheremisinov A.Yu., Zherdev V.N., Cheremisinov A.A., 2013. *Dinamika klimata, vodnykh balansov i resursov Tsentralnogo Chernozemya: monografiya* [The Dynamics of Climate, Water Balance and Resources of the Central Chernozem Region: monograph]. Voronezh, Voronezhskiy GAU Publ., 326 p. (In Russian).

4 Snyder R.L., Orang M., Matyac S., Grismer M. E., 2005. Simplified Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, May/June, pp. 249–253.

5 Shchedrin V.N., Kulygin V.A., 2011. [The features of water consumption on growing periods of some vegetables under irrigation]. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo*, no 2, pp. 28-31. (In Russian).

6 Grigorov M.S., Cheremisinov A.Yu., 2001. Neobkhodimy novyye podkhody k orosheniyu chernozemov [New approaches are needed to irrigate Chernozems]. *Zemledeliye*, no 10, 35 p. (In Russian).

7 Konstantinov A.P., Strunnikov E.A., 1986. Normirovaniye orosheniya: metody, ikh otsenka, puti utochneniya [Setting of irrigation rates: methods, their evaluation, and ways of adjusting]. *Gidrotekhnika i melioratsiya*, no 1, pp. 19-28. (In Russian).

8 Dingman S. Lawrence, 2002. *Physical Hydrology*, 2nd ed., NJ, USA: Prentice Hall, 646 p.

9 Cheremisinov A.Yu., Popelo V.D., Zemlyanukhin I.P., Kruglov N.M., 2010. *Meteorologiya i klimatologiya: ucheb. posobiye* [Meteorology and Climatology: Tutorial]. Voronezh, 233 p. (In Russian).

10 Cheremisinov A.Yu., Burlakin S.P., Cheremisinov A.A., 2012. *Melioratsiya: ucheb. posobiye* [Amelioration: Tutorial]. Voronezh, Voronezhskiy GAU Publ., 243 p. (In Russian).

11 Budyko M.I., 1971. *Klimat i zhizn* [Climate and Life]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 472 p. (In Russian).

12 Mezentsev B.C., Karnatsevich I.V., 1969. *Uvlazhnennost Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Moisture of the West Siberian Plain]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 168 p. (In Russian).

13 Walter I.A., Allen R.G., Elliott R., Jensen M.E., Itenfisu D., Mecham B., Howell T.A., Snyder R., Brown P., Echings S., Spofford T., Hattendorf M., Cuenca R.H., Wright J.L., Martin D., 2001. ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation. *Proceedings Watershed Management and Operations Management 2000*, pp. 1-11, [http://dx.doi.org/10.1061/40499\(2000\)126](http://dx.doi.org/10.1061/40499(2000)126).

14 Kostyakov A.N., 1933. *Osnovy melioratsii: ucheb. posobiye* [Fundamentals of Amelioration: tutorial, 3<sup>rd</sup> ed.]. Moscow, Leningrad, State Publ. of Collective and Soviet Farms, 887 p. (In Russian).

15 Lgov G.K., 1979. *Oroshayemoye zemledeliye* [Irrigated Agriculture]. Moscow, Kolos Publ., 191 p. (In Russian).

16 Cheremisinov A.Yu., Burlakin S.P., Zemlyanukhin I.P., Cheremisinov A.A., Plotnikov S.A., 2012. Vodopotrebleniye i kachestvo vody pri oroshenii selskokhozyaystvennykh kultur [Water consumption and water quality at irrigation of agricultural crops]. *Agroekologicheskiy vestnik: sbornik*. [Agroecological Herald: Collection of Articles], Voronezh, Voronezh. GAU Publ., pp. 53-58. (In Russian).

17 Sharov I.A., 1959. *Ekspluatatsiya gidromeliorativnykh sistem* [Operation of Irrigation Systems]. Moscow Selkhozgiz Publ., 448 p. (In Russian).

18 Ivanov N.N., 1954. Ob opredelenii velichin ispariyayemosti [Determination of the quantities of evaporation]. *Izvestiya VGO*, Vol. 86, no. 2, pp. 189-196. (In Russian).

19 Molchanov A.A., 1963. Summarnoye ispareniiye i transpiratsiya v lesu i na bezlesnykh ploshchadyakh [Total evaporation and transpiration in the forest and treeless areas]. *Les i Vody: Sbornik* [Forest and Waters: Collection of Articles]. M., Geografiz Publ., pp. 55-76. (In Russian).

20 Shtoyko D.A., 1965. Normativy proyektirovaniya rezhimov orosheniya selskokhozyaystvennykh kultur i gidromodulya v usloviyakh intensivnogo ispolzovaniya oroshayemykh zemel [Standards for design irrigation modes of crops and hydromodulus under intensive use of irrigated land]. *Oroshayemoye zemledeliye v YeCh SSSR* [Irrigated Agriculture in the European Part of USSR]. Moscow, Kolos Publ., pp. 171-185. (In Russian).

21 Alpatyev S.M., 1973. *Metodika Rascheta Rezhimov Orosheniya Selskokhozyaystvennykh Kultur Na Osnove Bioklimaticheskogo Metoda Dlya Yevropeyskoy Chasti SSSR S Primeneniyem EVM* [Methods for Calculating Crop Irrigation Regimes Based on Bioclimatic Method for the European Part of the USSR by Using Computers]. Kiev, 9 p. (In Russian).

22 Ostapchik V.P., 1989. *Informatsionno-sovetuyushchaya sistema upravleniya orosheniyem* [Information and Advising System of Irrigation Management]. Kiev, Urozhay Publ., 248 p. (In Russian).

23 Tsipris D.B., Yevtushenko E.G., 1980. Raschet vodopotrebleniya po meteoparametram [The calculation of water consumption by meteorological parameters]. *Gidrotekhnika i melioratsiya*, no. 9, pp. 40-42. (In Russian).

24 Kharchenko S.I., 1975. *Gidrologiya oroshayemykh zemel* [Hydrology of irrigated lands]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 375 p. (In Russian).

25 Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc., London (A)*, Vol. 193, pp. 120-145.

26 Penman H.L., 1968. Растение и влага [Plant and water]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 161p. (In Russian).

27 Monteith J.L., 1965. Evaporation and Environment. *Proc. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology*. Cambridge: University Press, Vol. 19, pp. 205-234.

28 Jensen M.E., Burman R.D., 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices*, Am. Soc. Civil Engrs., no. 70, N. Y., 360 p.

29 Doorenbos J., Kassam A.H., 1979. Yield response to water. *Irrig. and Drain. Paper (FAO)*, no. 33, Rome (Italy): FAO, 193 p.

30 Allen R.G. [et al.], 1996. Chapter 4. Evaporation and Transpiration. *ASCE Handbook of Hydrology*. N. Y., pp. 125-252.

31 Allen R.G., 1992. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. Div., Rome. 50 p.

32 Chiew F.H.S., Kamadalasa N.N., Malano H.M., McMahon T.A., 1995. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agric. Water Management*, vol. 28, pp. 9-21.

33 Thorntwaite C.W., Mather J.R., 1955. *The water balance*. Ibid. 8, p. 104.

34 Blaney H.F., Criddle W.D., 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96, 44 p.

35 Turc L., 1961. Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula. *Annales Agronomiques*, no. 12, pp. 13-49.

---

### **Черемисинов Андрей Александрович**

Ученая степень: кандидат экономических наук

Должность: доцент кафедры мелиорации, водоснабжения и геодезии

Место работы: федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Адрес организации: ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087

E-mail: achery@mail.ru

**Cheremisinov Andrey Aleksandrovich**

Degree: Candidate of Economic Sciences

Position: Associate Professor of the Department of Reclamation, Water Supply and Geodesy

Affiliation: Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great

Affiliation address: st. Mitchurina, 1, Voronezh, Russian Federation, 394087

E-mail: achery@mail.ru

**Черемисинов Александр Юрьевич**

Ученая степень: доктор сельскохозяйственных наук

Ученое звание: профессор

Должность: заведующий кафедрой мелиорации, водоснабжения и геодезии

Место работы: федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Адрес организации: ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087

E-mail: melioal@mail.ru

**Cheremisinov Aleksandr Yuryevitch**

Degree: Doctor of Agricultural Sciences

Title: Professor

Position: Head of the Department of Reclamation, Water Supply and Geodesy

Affiliation: Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great

Affiliation address: st. Mitchurina, 1, Voronezh, Russian Federation, 394087

E-mail: melioal@mail.ru