

# • МЕЛИОРАЦИЯ •

УДК 626.86:551.5

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОТЕРМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ РАСТЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА ПОЧВЫ

*И. А. Романов<sup>1</sup>, ассистент*

*А. П. Лихацевич<sup>2</sup>, доктор технических наук*

*Г. В. Латушкина<sup>2</sup>, кандидат технических наук*

<sup>1</sup>УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», г. Горки, Беларусь

<sup>2</sup> РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

### Аннотация

Водопотребление растений зависит от почвенно-климатических условий и физиологии культуры и как элемент водного баланса включает транспирацию растений и испарение с поверхности почвы. Водопотребление сложно измерить, поэтому его обычно вычисляют с использованием косвенных показателей. Наиболее точным, как показали результаты многочисленных исследований, является биоклиматический метод расчета водопотребления, когда в расчетах используется достаточно устойчивая корреляция потребления влаги сельскохозяйственным полем с одним из метеопоказателей: например, с дефицитом влажности воздуха, или со среднесуточной, или с максимальной за сутки температурой воздуха. Биологическая составляющая в этой связи учитывается через так называемые биоклиматические (биотермические) коэффициенты. В наших расчетах водопотребление растений увязывалось с максимальной за сутки температурой воздуха, для чего использовались биотермические коэффициенты. Сравнительный анализ измеренных в поле и рассчитанных почвенных влагозапасов показал, что точность расчета водного баланса почвы существенно зависит от способа установления биотермических коэффициентов водопотребления сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** водный баланс почвы, биотермические коэффициенты, водопотребление растений, ошибка опыта, среднеквадратичные отклонения.

### Abstract

*I. A. Romanov, A. P. Likhachevich, G. V. Latushkina*

### THE INFLUENCE OF THE METHOD FOR DETERMINING OF THE BIOTHERMAL COEFFICIENTS OF PLANT WATER CONSUMPTION ON THE ACCURACY OF CALCULATIONS OF THE SOIL WATER BALANCE

Plant water consumption depends on soil and climatic conditions and culture physiology and, as an element of water balance, includes plant transpiration and evaporation from the soil surface. Water consumption is difficult to measure, so it is usually calculated using indirect indexes. The most accurate as indicated by numerous research, is the bioclimatic method for calculating water consumption, when calculations are based on a rather stable correlation of moisture consumption on an agricultural field with one of the meteorological indicators, for example, with a deficit of air humidity, daily average or maximum air temperature. In this regard, the biological component is taken into account through the so-called bioclimatic (biothermal) coefficients. In our calculations, plant water consumption was linked to the maximum air temperature per day, using biothermal coefficients. Comparative analysis of measured in the field and calculated soil moisture reserves showed that the accuracy of calculating the soil water balance to a great extent depends on the method of establishing the biothermal coefficients of water consumption of crops.

**Keywords:** water balance soil, biothermal coefficients, evapotranspiration, field experiment error, standard deviations.

### Введение

Технологии управления водным режимом растений при орошении базируются на основе контроля за элементами водного баланса почвы

[1, 2]. Процесс водобалансового расчета состоит из последовательных операций, направленных на определение почвенных влагозапасов в кон-

це очередного расчетного интервала, начиная от исходной даты (начало расчета) и завершая концом оросительного периода. От точности водобалансового расчета зависит точность определения даты начала очередного полива.

Водопотребление, или так называемое суммарное испарение (эвапотранспирация) сельскохозяйственного поля, зависит от увлажненности почвы и теплоэнергетических ресурсов приземного слоя атмосферы. Наличие связи названных факторов с водопотреблением сельскохозяйственных культур подтверждено в условиях недостаточного и неустойчивого естественного увлажнения в исследованиях А. Н. Костякова, А. М. Алпатьева, С. М. Алпатьева, М. С. Григорова, Н. Н. Иванова, А. Р. Константинова, И. П. Кружилина, Е. А. Стельмаха, Н. В. Окулика, В. И. Ольгаренко, И. А. Шарова и многих других авторов [1–4 и др.]. На основании результатов этих ис-

следований А. М. Алпатьевым и И. А. Шаровым разработан биоклиматический метод расчета водопотребления с использованием так называемых биоклиматических и биотермических коэффициентов. С помощью биоклиматических коэффициентов (по Алпатьевым) водопотребление культур связывают с дефицитами влажности воздуха, а биотермические коэффициенты (модуль испарения по Шарову) используются для установления связи водопотребления с среднесуточными температурами воздуха. При разработке соответствующих расчетных формул обычно ориентируются на некий заданный (плановый) урожай, получаемый при оптимальной влажности почвы, полагая, что можно ограничиться только связью водопотребления с одним из метеофакторов (дефицитом влажности воздуха, среднесуточными температурами воздуха).

### Методы исследований

В своих исследованиях в качестве фактора, управляющего водопотреблением сельскохозяйственного поля, мы использовали максимальную за сутки температуру воздуха, измеряемую, согласно наставлениям гидрометеорологической службе, один раз в сутки. При расчете водопотребления растений по максимальной суточной температуре воздуха биология культуры учитывается с использованием биотермических коэффициентов [5].

Для учета влияния почвенной влажности на величину биотермического коэффициента определение водопотребления производится поэтапно. Сначала вычисляется максимальное водопотребление при достаточном увлажнении почвы (при содержании влаги в расчетном слое почвы на уровне наименьшей влагоемкости) [4, 5]:

$$E_{mj} = k_{tmj} \sum_1^j t_m, \quad (1)$$

где  $E_{mj}$  – максимальное водопотребление за  $j$ -й интервал времени при достаточном увлажнении почвы (при содержании влаги в расчетном слое почвы на уровне наименьшей влагоемкости);  $k_{tmj}$  – биотермический коэффициент за  $j$ -й интервал времени, зависящий от фазы развития растений, мм/°С;  $j$  – продолжительность  $j$ -го интервала между смежными замерами почвенной влажности, сут.;

$\sum_1^j t_m$  – сумма максимальных суточных температур воздуха за  $j$ -й интервал времени, °С.

Затем определяется водопотребление, учитывающее уровень фактического увлажнения почвы [4, 5]:

$$E_j = \varphi_j E_{mj}, \quad (2)$$

где  $E_j$  – водопотребление культуры за  $j$ -й интервал времени;  $\varphi_j$  – коэффициент, учитывающий зависимость водопотребления за  $j$ -й интервал времени от степени увлажненности почвы, определяется по формуле [4, 5]

$$\varphi_j = \exp \left[ -\mu \left( \frac{W_{HB}}{W_{Hj}} - 1 \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $\mu$  – показатель, характеризующий интенсивность снижения водопотребления при понижении содержания влаги в корнеобитаемом слое почвы;  $W_{HB}$  – влагозапасы расчетного слоя почвы при насыщении до наименьшей влагоемкости, мм;  $W_{Hj}$  – фактические влагозапасы в начале  $j$ -го интервала времени, мм.

В методиках расчета водного баланса почвы традиционно ориентируются на декадный интервал (10–11 суток). Именно к этому интервалу привязываются и биотермические коэффициенты. Но отбор почвенных образцов для установления их влажности термостатно-весовым способом и дальнейшего определения водопотребления (из уравнения водного

баланса) может производиться в процессе вегетации культуры с произвольными временными интервалами. Чтобы от произвольного интервала времени перейти к декаде, используются:

- расчетный способ, включающий расчет по формулам (1)–(3), за интервалы времени, входящие в данную декаду, и дальнейшее уточнение декадного водопотребления как средневзвешенной величины по продолжительности каждого интервала, входящего в данную декаду. Расчет декадных биотермических коэффициентов путем обратного расчета

$$k_{tmi} = \frac{E_i}{\varphi_i \sum_1^i t_{mi}}, \quad (4)$$

где  $k_{tmi}$  – биотермический коэффициент за  $i$ -ю декаду, мм/°С;  $E_i$  – водопотребление культуры за  $i$ -ю декаду, мм;  $\varphi_i$  – коэффициент, учитывающий зависимость водопотребления за  $i$ -ю декаду от степени увлажнения почвы;  $i$  – продолжительность  $i$ -й календарной декады (10–11 сут.);  $\sum_1^i t_m$  – сумма максимальных суточных температур воздуха за  $i$ -ю декаду, °С;

- графоаналитический способ, включающий *на первом этапе* построение интегральной кривой водопотребления, где по оси абсцисс располагаются номера календарных дат от начала вегетации, а по оси ординат нарастающим итогом фиксируется водопотребление (суммарное испарение, эвапотранспирация), соответствующее номерам дат отбора почвенных образцов и рассчитанное по формулам (1)–(3); *на втором этапе* отрезки, соответствующие началу каждой декады, фиксируются прямыми, параллельными оси ординат от нулевой ординаты до интегральной кривой водопотребления с засечками в точках пересечения с интегральной кривой; *на третьем этапе* проводятся прямые, параллельные оси абсцисс, от полученных точек пересечения с интегральной кривой водопотребления до оси ординат; *на четвертом этапе* с оси ординат снимаются величины сумм водопотребления за выделенные календарные декады; *на пятом этапе* выполняется расчет декадных сумм суточных максимальных температур; *на шестом этапе* – расчет декадных биотермических коэффициентов по формуле (4).

Установленные расчетным и графоаналитическими способами величины биотермических коэффициентов в течение одного вегетационного периода для конкретных календарных декад практически совпадают по величине. Но по годам эти коэффициенты могут существенно различаться. В качестве выхода из подобной неопределенности предложено все проблемы решать путем осреднения биотермических коэффициентов за многолетие. Такое осреднение приемлемо для ретроспективных расчетов, в частности, при установлении проектных режимов орошения. Но при управлении поливом в конкретных условиях подобные осреднения могут приводить к значительным ошибкам, поскольку в разные годы начало вегетации и сроки последовательного прохождения фаз развития растений могут различаться.

Оценка способа установления биотермических коэффициентов выполнялась нами на примере орошения дождеванием многолетних трав 3-укосного использования. Эта культура выбрана исходя из уникальной возможности в течение каждого сезона получать по три ряда биотермических коэффициентов, по которым можно оценивать практическую приемлемость того или иного способа их установления. Опыты по орошению многолетних трав проводились в течение 2017–2020 гг. на испытательном комплексе «Тушково-1» вблизи дер. Гоц-Чарный Горецкого р-на Могилевской обл. Закладка опыта проведена в начале вегетации 2017 г. Структура многолетних трав состояла из бобово-злаковой травосмеси. Фон удобрений на всех вариантах опыта составлял  $P_{60}K_{90}$ . Использование травостоев 3-укосное со скашиванием в фазу цветения бобового элемента и колошения злаковых. Норма высева рассчитана по И. В. Ларину. Посев многолетних трав выполнялся в апреле 2017 г. сеялкой СПУ-6 под покров ярового ячменя, уборка которого проведена в конце июля. Поэтому все данные по динамике водного режима почвы и водопотреблению трав 2017 г. соотносились с данными 2018 и 2019 гг., характеризующими третий укос с периодом вегетации август – сентябрь.

Дождевание осуществлялось с помощью БШДУ *Bauer Rainstar* Т61. Поливы проводились в соответствии с утвержденными стандартами и рекомендациями [5]. С целью изучения влия-

ния диапазона колебаний почвенной влажности на водопотребление орошаемой культуры первый вариант дождевания (РО-1) допускал кратковременное снижение почвенной влажности в корнеобитаемом слое почвы при вегетации третьего укоса до 40–50 % от наименьшей влагоемкости, второй вариант дождевания (РО-2) – до 40–50 % от наименьшей влагоемкости при вегетации второго укоса. Контрольным являлся вариант без орошения (БО).

Определение сроков начала поливов выполнялось с помощью водобалансовых расчетов и контролировалось послойным измерением фактических влагозапасов почвы термостатно-весовым способом [6]. Дождевание проводилось позиционно, по сектору, в утренние часы, чтобы уменьшить снос искусственного дождя ветром. Точность выдачи поливной нормы контролировалась осадкамерами.

Водно-физические свойства почвы определялись с использованием стандартных методик: наименьшая влагоемкость почвы – методом затпливаемых площадок [7]; плотность почвы – методом режущего кольца [8]; плотность твердой фазы почвы – пикнометрическим методом [8]; пористость почвы – расчетным путем [9]; гранулометрический состав – ареометрическим методом [9].

Пробы почвы на влажность на опытных площадках отбирались по слоям 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 и 40–50 см с помощью почвенного бура. Влажность почвы определялась термостатно-весовым способом с использованием технических весов ВК-600 для взвешивания почвенных образцов и сушильного шкафа-термостата для их сушки. Максимальная температура воздуха и атмосферные осадки измерялись ежедневно в 19 часов на метеопосту, расположенном непосредственно на границе орошаемого участка.

Водобалансовый расчет велся по стандартной методике при суточном расчетном интервале [5]. Рассмотрены три способа водобалансового расчета: с использованием средних за декаду (декадных), средних за укос (укосных) и средних за вегетацию (вегетационных) биотермических коэффициентов при участии данных 2017 г. в качестве показателей 3-го укоса многолетних трав. Каждый способ расчета включал два варианта. В

первом варианте расчета значения биотермических коэффициентов определялись по замеренным в поле почвенным влагозапасам. Во втором варианте расчета декадные, укосные и вегетационные биотермические коэффициенты устанавливались путем подбора с целью получения наименьших среднеквадратичных отклонений между почвенными влагозапасами, вычисленными и замеренными в поле.

Согласно действующим рекомендациям, водопотребление определяется по метеопказателю (дефициту влажности воздуха, среднесуточной температуре воздуха, максимальной за сутки температуре воздуха), значение которого осредняется за предыдущие 10 суток с целью исключения резких перепадов полученных величин водопотребления при суточном интервале водобалансового расчета [5]. Однако до настоящего времени не проводились какие-либо исследования, подтверждающие установленную продолжительность осреднения метеопказателя, и неясно, как эта продолжительность влияет на точность водобалансового расчета. В связи с этим нами была предусмотрена возможность менять продолжительность интервала, в течение которого осредняется используемая в расчетах максимальная за сутки температура воздуха.

На основе сделанных замечаний в качестве способов определения биотермических коэффициентов многолетних трав, трижды скашиваемых за сезон, мы использовали:

1) стандартный способ определения декадных, укосных и вегетационных значений биотермических коэффициентов, представленный выше формулами (1)–(4);

2) подбор значений декадных, укосных и вегетационных биотермических коэффициентов, позволяющих до минимума снизить среднеквадратичные (стандартные) отклонения рассчитанных почвенных влагозапасов от замеренных в поле;

3) определение стандартных отклонений в динамике почвенных влагозапасов при различной продолжительности интервала осреднения максимальной за сутки температуры воздуха, используемой в вычислениях водопотребления.

### Результаты исследований и их обсуждение

Биотермические коэффициенты определялись из уравнения водного баланса на первом

этапе для периодов между смежными датами замера почвенных влагозапасов (датами отбора

в поле почвенных образцов) в корнеобитаемом слое многолетних трав. В 2017 г. таких замеров было 8, в 2018 г. – 21, в 2019 г. – 17. На втором этапе расчета полученные за выделенные периоды биотермические коэффициенты определялись по формулам (2)–(3) посуточно, пропорционально начальным почвенным влагозапасам на каждые сутки, вычисленным при рекомендуемом значении показателя  $\mu$ , характеризующего интенсивность снижения водопотребления при понижении содержания влаги в корнеобитаемом слое почвы ( $\mu = 0,5$ ) [4].

На рис. 1 показаны результаты расчета динамики влагозапасов почвы в 2018 г. по вычисленным суточным биотермическим коэффициентам. Как видим, для одного года расчет водопотребления многолетних трав по суточ-

ным биотермическим коэффициентам, вычисленным по замеренным влагозапасам, дает полное совпадение рассчитанных и замеренных их величин. Аналогичный результат получен в 2017 г. и 2019 г.

В то же время определение водопотребления по среднемноголетним значениям биотермических коэффициентов для одной и той же календарной декады приводит при водобалансовом расчете к существенным различиям между рассчитанными и замеренными почвенными влагозапасами в каждом году.

На рис. 2 приведены хронологические графики декадных биотермических коэффициентов для многолетних трав 3-укосного использования, вычисленные по формулам (1)–(4) для каждого года, и средние для трех лет.

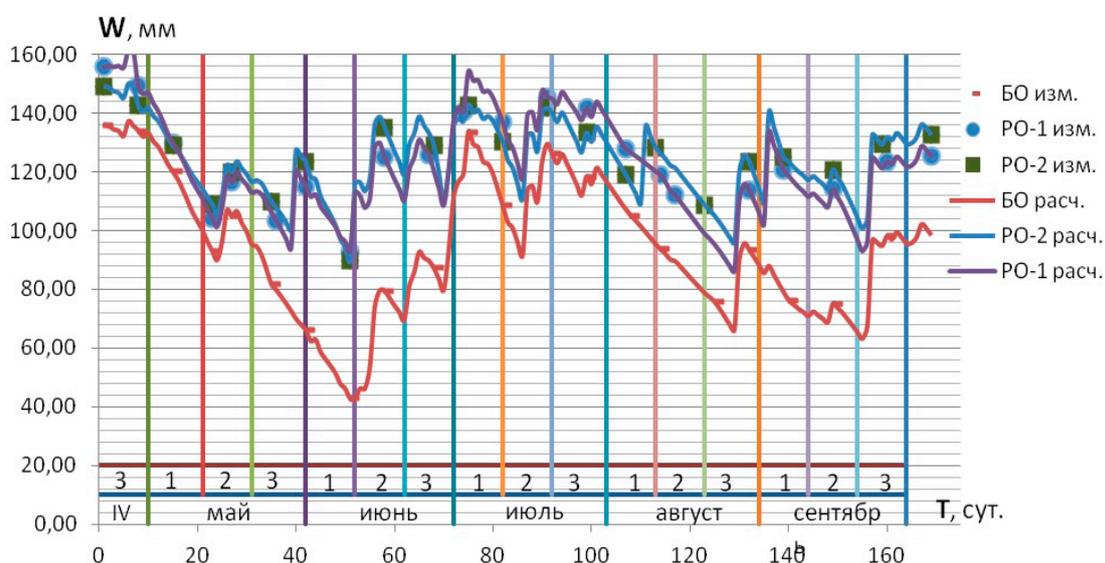


Рис. 1. Графики динамики почвенных влагозапасов по вариантам опыта, использованные для определения суточных значений биотермических коэффициентов в 2018 г.

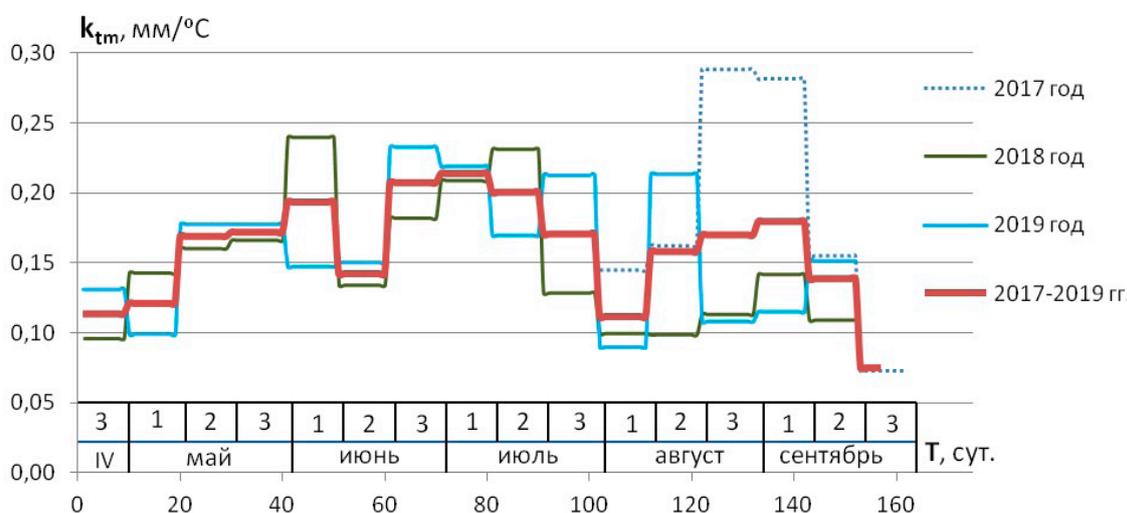


Рис. 2. Изменение биотермических коэффициентов многолетних трав 3-укосного использования по декадам вегетационных периодов 2017–2019 гг., вычисленных по формулам (1)–(4)

Наблюдающиеся колебания декадных значений биотермических коэффициентов в пределах одного года сложно связать с динамикой роста биологической массы у многолетних трав в течение каждого укоса. Но осреднение биотермических коэффициентов по декадам вегетации за три года (2017–2019) четко указывает на 3-укосное использование травостоя. Есть пониженное водопотребление в начале вегетации каждого укоса, есть и максимум водопотребления в течение этой вегетации.

В водобалансовых расчетах показатель, характеризующий интенсивность снижения водопотребления растений при понижении содержания влаги в корнеобитаемом слое почвы, принимался, согласно нормативу, равным 0,5 [4]. Вместе с тем научное обоснование данной рекомендации отсутствует. Для того чтобы оценить справедливость предложенного равенства ( $\mu = 0,5$ ), мы провели водобалансовые расчеты при разных величинах данного коэффициента. Причем в соответствии со схемой опыта для оценки зависимости показателя  $\mu$  от уровня влагообеспеченности периода вегетации культуры на вариантах с орошением (РО-1 и РО-2) в годы исследований допускались кратковременные понижения почвенной влаги, чтобы выявить их влияние на величину данного показателя. Например, установленное водобалансовым расчетом по декадным биотермическим коэффициентам минимальное содержание почвенной влаги на варианте РО-1 (53,6 мм) имело место 27 августа 2018 г. как следствие пропуска одного полива в первой декаде августа. На варианте РО-2 полив в 2018 г. был проведен 9 августа нормой 30 мм, после чего к 27 августа в корнеобитаемом слое сохранилось 67,0 мм влаги. В 2019 г. минимум содержания почвенной влаги на вариантах с орошением наблюдался 5 июня (на варианте РО-1 – 67,4 мм, а на варианте РО-2 – 68,8 мм). Заметим, что первый укос многолетних трав в 2019 г. был проведен 3 июня, а поливы на орошаемых вариантах опыта нормой 30 мм были выполнены 6 июня. Использование такой схемы опыта предполагало приближение к реальным производственным условиям, в которых подобное смещение поливов может возникать достаточно часто.

В качестве критерия точности выполненных расчетов при разных величинах коэффи-

циента  $\mu$  использованы среднеквадратичные (стандартные) отклонения вычисленных влагозапасов от замеренных в поле. Эти отклонения определялись по известной формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W - W_{\text{изм.}})^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – среднеквадратичное отклонение вычисленных влагозапасов ( $W$ ) от измеренных ( $W_{\text{изм.}}$ ), мм;  $n$  – количество измеренных значений влагозапасов, участвующих в расчете.

Декадные, укосные и вегетационные биотермические коэффициенты определялись путем осреднения суточных значений за декаду, укос, вегетацию соответственно. Сначала осреднение выполнялось для каждого года, а затем – для всех лет исследований. Согласно результатам расчета, получено в 1-м укосе  $k_{tm1} = 0,15$ ; во 2-м  $k_{tm2} = 0,19$ ; в 3-м укосе  $k_{tm3} = 0,14$ , а в среднем за вегетацию  $k_{tm(\text{cp})} = 0,16$ .

В табл. 1 приведены среднеквадратичные отклонения ( $\delta$ , мм) между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по формулам (1)–(4). Согласно рекомендациям, при расчетах водопотребления максимальная за сутки температура воздуха осреднялась за 10 суток, предыдущих дате расчета [4, 5]. Поскольку все данные по динамике водного режима почвы и водопотреблению многолетних трав 2017 г. характеризуют только один укос из трех, то при расчете средневзвешенных величин весовой коэффициент для этого года принят равным  $1/3 = 0,333$ . Данные 2017 г. соотносились с тремя укосами 2018 и 2019 гг., весовой коэффициент для которых принят равным 1,0. В расчетах для определения средневзвешенных по вариантам опыта за 2017–2019 гг. среднеквадратичных отклонений использовалась формула

$$\delta_{\text{cp.}} = \frac{0,333\delta_{2017} + \delta_{2018} + \delta_{2019}}{2,333}. \quad (6)$$

Данные табл. 1 указывают на то, что рекомендуемое значение показателя ( $\mu = 0,5$ ), характеризующего в формуле (2) интенсивность снижения водопотребления при пониженном содержании влаги в корнеобитаемом слое почвы, не в полной мере соответствует результатам полевого опыта. Как видим, с повышением влагообеспеченности культуры значение показателя  $\mu$  увеличивается.

Таблица 1. Среднеквадратичные отклонения (мм) между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по декадным биотермическим коэффициентам, полученным по формулам (1)–(4), при различных значениях показателя  $\mu$

Вариант опыта	Год	Значения показателя $\mu$					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Расчет по декадным биотермическим коэффициентам							
БО	2017	11,8	12,7	13,3	13,8	14,2	14,6
	2018	10,9	9,4	12,0	14,5	16,5	18,2
	2019	11,0	8,9	11,5	13,9	15,9	17,6
	среднее	11,0	9,7	12,0	14,1	15,9	17,4
РО-1	2017	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	12,0
	2018	19,0	14,5	12,2	10,9	10,2	9,9
	2019	21,2	14,6	11,2	9,2	7,9	7,2
	среднее	19,0	14,2	11,8	10,3	9,5	9,0
РО-2	2017	9,1	9,0	8,6	8,7	8,6	8,5
	2018	16,7	12,9	10,6	9,1	8,1	7,4
	2019	14,5	11,4	9,6	8,6	7,8	7,4
	среднее	14,7	11,7	9,9	8,8	8,0	7,6
среднее по вариантам		14,9	11,8	11,2	11,1	11,1	11,3
Расчет по укосным биотермическим коэффициентам							
БО	2017	13,5	14,0	14,4	14,7	15,0	15,3
	2018	10,8	9,5	11,9	14,2	16,1	17,7
	2019	8,8	8,7	12,2	15,0	17,0	18,7
	среднее	10,3	9,8	12,4	14,6	16,3	17,8
РО-1	2017	16,9	16,6	16,3	16,0	15,8	15,6
	2018	20,4	16,0	13,7	12,3	11,5	11,0
	2019	19,8	13,4	10,6	9,0	8,2	7,8
	среднее	19,6	15,0	12,7	11,4	10,7	10,3
РО-2	2017	14,5	14,0	13,6	13,3	13,0	12,7
	2018	17,7	14,0	11,7	10,2	9,1	8,4
	2019	12,6	9,9	8,5	7,8	7,5	7,3
	среднее	15,1	12,2	10,6	9,6	9,0	8,5
среднее по вариантам		15,0	12,3	11,9	11,9	12,0	12,2
Расчет по вегетационным биотермическим коэффициентам							
БО	2017	12,0	12,8	13,1	13,4	13,7	14,0
	2018	11,3	11,1	13,1	15,0	16,7	18,2
	2019	10,8	13,3	15,8	17,7	19,3	20,7
	среднее	11,2	12,3	14,3	15,9	17,4	18,7
РО-1	2017	14,8	14,5	14,2	14,0	13,8	13,6
	2018	21,9	17,3	14,8	13,3	12,4	11,8
	2019	16,7	13,0	11,1	9,9	9,1	8,7
	среднее	18,7	15,1	13,1	11,9	11,2	10,7
РО-2	2017	13,5	13,1	12,7	12,3	12,0	11,7
	2018	20,8	16,5	14,0	12,3	11,1	10,2
	2019	14,9	12,2	10,7	9,7	9,1	8,8
	среднее	17,2	14,2	12,4	11,2	10,4	9,8
среднее по вариантам		15,7	13,8	13,2	13,0	13,0	13,1

Например, из табл. 1 следует, что в условиях неустойчивой естественной влагообеспеченности, то есть при отсутствии орошения, значение показателя  $\mu$  в формуле (2) близко к рекомендуемому и колеблется в пределах 0,5–1,0. Но в условиях орошения значение показателя  $\mu$  повышается до 2,0 и выше. Следовательно, имеет место зависимость данного показателя от среднего уровня влагообеспеченности вегетационного периода. Вместе с тем расчеты показывают, что показатель  $\mu$  не реагирует на кратковременные понижения почвенной влажности до 40–50 % от НВ на орошаемых вариантах РО-1 и РО-2.

Несколько другой результат водобалансовых расчетов получен с использованием декадных, укосных и вегетационных биотермических коэффициентов, найденных методом подбора, имеющего целью добиться минимальных различий между рассчитанными и замеренными в поле почвенными влагозапасами. Оказалось, что величины декадных, укосных и вегетационных биотермических коэффициентов, найденных методом подбора, не совпадают с аналогичными коэффициентами, вычисленными с использованием формул (1)–(4) по данным полевого опыта. Данное различие наглядно иллюстрирует рис. 3.

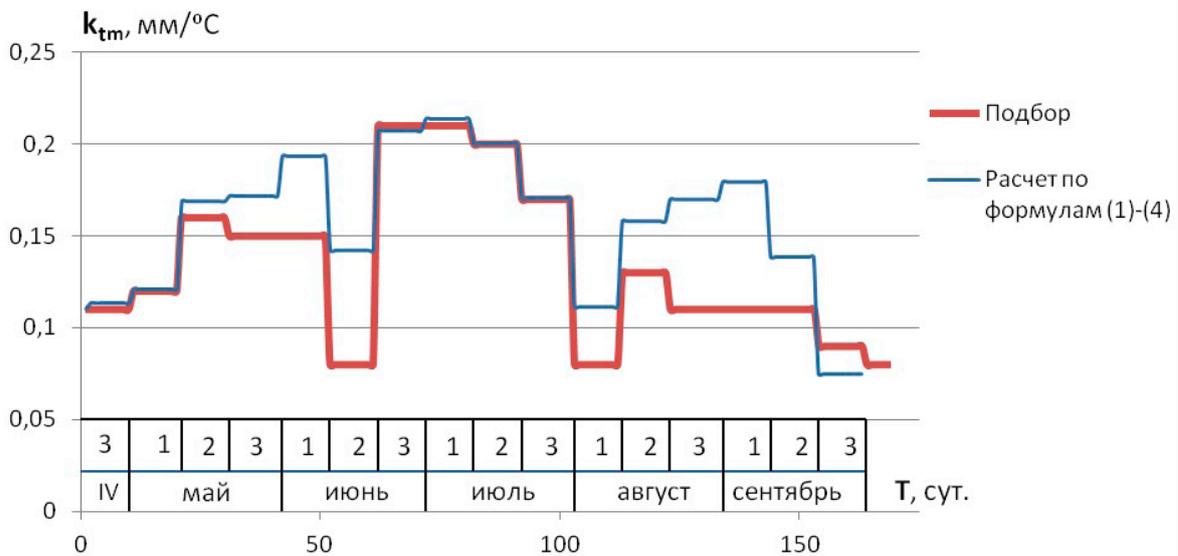


Рис. 3. Средние за 2017–2019 гг. биотермические коэффициенты многолетних трав 3-укосного использования, вычисленные по формулам (1)–(4) и найденные методом подбора

Таблица 2. Среднеквадратичные отклонения (мм) между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по декадным биотермическим коэффициентам, найденным методом подбора, при различных значениях показателя  $\mu$

Вариант опыта	Год	Значения показателя $\mu$				
		0	0,5	1,0	1,5	2,0
БО	2017	14,9	16,7	17,4	17,8	18,1
	2018	34,4	8,8	13,0	16,4	18,7
	2019	38,7	7,0	12,2	15,4	17,9
	среднее	33,5	9,2	13,3	16,2	18,3
РО-1	2017	9,9	10,0	10,1	10,2	10,3
	2018	15,4	10,6	9,4	9,3	9,5
	2019	11,9	6,2	5,0	5,0	5,5
	среднее	13,1	8,6	7,6	7,6	7,9
РО-2	2017	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9
	2018	6,7	6,1	5,9	5,9	5,9
	2019	6,5	5,5	5,8	6,5	7,3
	среднее	6,6	6,0	6,0	6,3	6,6
среднее по вариантам		17,7	7,9	9,0	10,0	10,9

В табл. 2 приведены среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по декадным биотермическим коэффициентам, найденным методом подбора. Как видим, результаты расчета по подобранным коэффициентам оказались существенно точнее. Минимальные среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, вычисленными и замеренными в поле, снизились более чем на четверть (с 11,1 до 7,9 мм). При этом значение

показателя  $\mu$ , при котором получен лучший результат, также понизилось до 0,5 на варианте без орошения и до 1,0 на вариантах с орошением.

В среднем за вегетацию значения биотермических коэффициентов, найденных методом подбора, оказались на 13 % меньше, чем вычисленных по формулам (1)–(4), причем корреляция между коэффициентами, вычисленными и найденными подбором, оказалась невысокой (рис. 4).

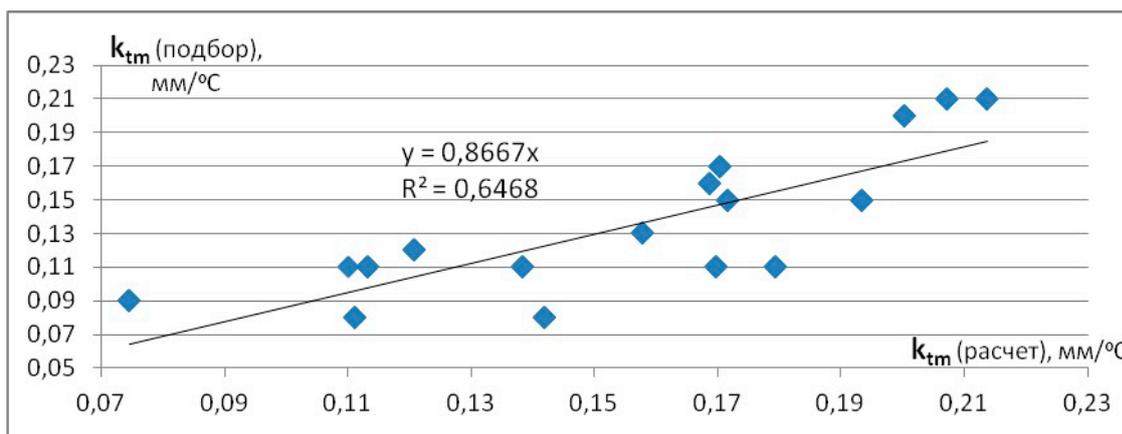


Рис. 4. Связь между биотермическими коэффициентами, вычисленными по формулам (1)–(4) и найденными методом подбора

Результаты сравнения данных табл. 1 и 2 указывают также на то, что уточнение значений биотермических коэффициентов методом подбора, имеющего целью добиться наименьшего различия между рассчитанными и замеренными в поле почвенными влагозапасами, – необходимый этап в методике их определения.

Причина различий между значениями биотермических коэффициентов, вычисленных по формулам (1)–(4) и уточненных методом подбора, на наш взгляд, состоит в разных условиях вегетации на варианте без орошения и на орошаемых вариантах. Определение между этими вариантами среднеарифметических величин биотермических коэффициентов является весьма грубым осреднением. Подбор значений коэффициентов позволяет точнее приблизить их к биологической кривой водопотребления культуры.

Значительный научный и практический интерес представляет влияние на результаты водобалансового расчета продолжительности интервала осреднения максимальных суточных температур воздуха при расчете водопотребления растений. На рис. 5 в качестве примера показан ход суточных и расчетных

максимальных температур воздуха, осредненных за 5 и за 10 суток в период вегетации 2018 г. Такая же закономерность справедлива для 2017 и 2019 гг.

В табл. 3 приведены среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по декадным биотермическим коэффициентам при максимальных суточных температурах, осредненных за  $n$ -е количество суток при различных значениях показателя  $\mu$ .

Как видим, осреднение температур почти не сказывается на ошибке водобалансового расчета. Вместе с тем, учитывая тенденцию изменения точности расчета, можно утверждать, что наилучшие результаты получены при осреднении максимальных температур воздуха за 5 суток. Большая продолжительность осреднения максимальных суточных температур не повышает точность результатов вычислений. На эти результаты также не влияет способ определения декадных биотермических коэффициентов. Точность водобалансового расчета не изменяется как при расчете коэффициентов по формулам (1)–(4), так и при их определении методом подбора.

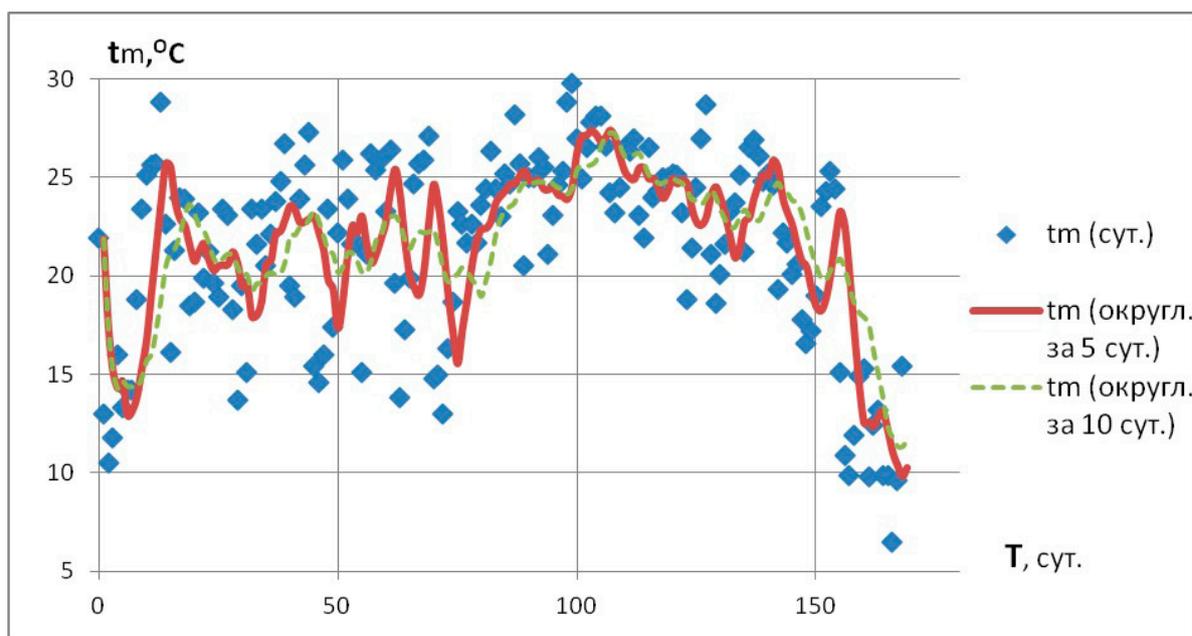


Рис. 5. Распределение максимальных температур воздуха суточных и осредненных за 5 и за 10 суток в период вегетации 2018 г.

Таблица 3. Осредненные за 2017–2019 гг. среднеквадратичные отклонения (мм) между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными при максимальных суточных температурах, округленных за  $n$ -е количество суток по декадным биотермическим коэффициентам

Вариант определения биотермич. коэфф.	Вариант округления ( $n$ , суток)	Значения показателя $\mu$					
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
По формулам (1)–(4)	1	50,1	15,0	11,9	11,3	11,2	11,3
	3	45,9	15,0	11,9	11,3	11,2	11,3
	4	45,7	14,9	11,8	11,2	11,2	11,2
	5	45,4	14,9	11,8	11,2	11,1	11,2
	6	45,1	14,9	11,8	11,2	11,1	11,2
	10	44,6	14,9	11,8	11,2	11,1	11,1
Методом подбора	1	18,1	8,0	9,1	10,2	11,1	11,9
	4	18,1	8,0	9,1	10,2	11,1	11,9
	5	18,0	7,9	9,0	10,1	11,0	11,8
	6	17,9	7,9	9,0	10,1	11,0	11,8
	10	17,7	7,9	9,1	10,1	10,9	11,7

Следует отметить, что согласно данным табл. 3, при устойчиво недостаточной естественной влагообеспеченности, когда орошение является необходимым условием получения урожая, с ростом показателя  $\mu$  значения декадных биотермических коэффициентов начинают выравниваться при разных способах их определения, а при  $\mu \geq 2,0$  эти значения совпадают по величине. Установленная закономерность объясняет совпадение декад-

ных биотермических коэффициентов (вычисленных по формулам и найденных методом подбора) во втором укосе многолетних трав (рис. 3).

В табл. 4 приведены найденные подбором укосные и вегетационные биотермические коэффициенты, а также среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по этим коэффициентам при различных значе-

ниях показателя  $\mu$ . Из таблицы следует, что в условиях естественной влагообеспеченности, то есть при отсутствии орошения, значение показателя  $\mu$  соответствует рекомендуемому 0,5.

В условиях орошения значение этого показателя повышается до 1,0–2,0 и более. Однако если рассматривать в совокупности все варианты опыта, то в среднем  $\mu = 0,5$ .

**Таблица 4. Биотермические коэффициенты (мм/°С) и среднеквадратичные отклонения (мм) между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по укосным и вегетационным величинам биотермических коэффициентов, найденных методом подбора, при различных значениях показателя  $\mu$**

Вариант опыта	Год	Значения показателя $\mu$				
		0	0,5	1,0	1,5	2,0
Расчет по укосным биотермическим коэффициентам						
Все варианты	2017–2019	Укосные биотермические коэффициенты, мм/°С				
	1-й укос	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15
	2-й укос	0,15	0,17	0,18	0,19	0,19
	3-й укос	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12
	За 3 укоса	0,12–0,13	0,13–0,14	0,14–0,15	0,14–0,15	0,15
Среднеквадратичные отклонения (мм), вычисленные по укосным биотермическим коэффициентам						
БО	2017	16,6	16,7	17,4	17,7	16,8
	2018	12,7	10,2	11,8	14,3	15,3
	2019	10,9	9,9	12,5	14,6	15,9
	среднее	12,5	11,0	12,9	14,9	15,8
РО-1	2017	11,1	11,7	11,5	11,6	12,3
	2018	11,5	12,0	10,1	10,2	10,5
	2019	7,7	9,6	8,9	8,8	8,3
	среднее	9,8	10,9	9,8	9,8	9,8
РО-2	2017	7,3	7,9	7,8	7,8	8,8
	2018	7,1	6,3	6,5	6,5	7,2
	2019	9,1	7,4	7,1	6,7	6,4
	среднее	8,0	7,0	6,9	6,8	7,1
среднее по вариантам		10,1	9,6	9,9	10,5	10,9
Среднеквадратичные отклонения (мм), вычисленные по вегетационным биотермическим коэффициентам						
БО	2017	12,7	14,3	15,0	14,6	15,0
	2018	19,2	13,9	16,0	16,0	17,9
	2019	12,5	15,5	18,9	19,1	20,9
	среднее	15,4	14,6	17,1	17,1	18,8
РО-1	2017	13,0	14,5	14,4	15,9	15,7
	2018	18,2	14,5	12,1	12,0	11,1
	2019	7,2	7,2	7,2	7,6	7,5
	среднее	12,7	11,4	10,3	10,7	10,2
РО-2	2017	9,9	11,6	11,4	13,1	12,8
	2018	8,3	9,9	8,6	9,7	8,7
	2019	10,1	9,3	9,4	9,0	9,0
	среднее	9,3	9,9	9,3	9,9	9,4
среднее по вариантам		12,5	12,0	12,3	12,5	12,8

Среднеквадратичное отклонение между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по подобранным укосным биотермическим коэффициентам, при  $\mu = 0,5$  составило 9,6 мм против 11,9 мм для коэффициентов, найденных традиционным способом (табл. 1). Аналогичный результат получен также при  $\mu = 0,5$  для подобранных вегетационных биотермических коэффициентов. Среднеквадратичное отклонение снизилось с 13,0 до 12,0 мм.

В табл. 5 представлена сводка данных табл. 1–3. С увеличением продолжительно-

сти действия биотермического коэффициента от декады к укосу и далее к вегетационному периоду точность водобалансового расчета снижается и среднеквадратичные отклонения расчета растут. Для биотермических коэффициентов, вычисленных по формулам (1)–(4), они повышаются от 11,1 до 11,9 соответственно и далее до 13,0 мм. При водобалансовом расчете по биотермическим коэффициентам, найденным методом подбора, эта закономерность сохраняется в пропорции от 7,9 до 9,6 и далее до 12,0 мм соответственно.

**Таблица 5. Сравнение показателей, определяющих точность водобалансового расчета по биотермическим коэффициентам, установленным по формулам (1)–(4) и методом подбора**

Биотермические коэффициенты	Способ определения биотермических коэффициентов				Повышение точности расчета, мм / %
	формулы (1)–(4)		метод подбора		
	$\mu$	ср.-квадратич. отклонение, мм	$\mu$	ср.-квадратич. отклонение, мм	
Вегетационные	2,0	13,0	0,5	12,0	1,0 / 7,7
Укосные	2,0	11,9	0,5	9,6	2,3 / 19,3
Декадные	2,0	11,1	0,5	7,9	3,2 / 28,8

Данные табл. 5 подтверждают справедливость использования в расчетах рекомендуемого значения показателя  $\mu$ , характеризующего в формуле (2) интенсивность снижения водопотребления при понижении содержания влаги в корнеобитаемом слое почвы. Его можно принимать равным  $\mu = 0,5$  при расчете водопотребления как по декадным, так по укосным и вегетационным биотермическим коэффициентам. Однако следует отметить, что в условиях орошаемого земледелия, согласно данным табл. 2 и 3, величина показателя  $\mu$  повышается.

Отметим, что расчет динамики почвенных влагозапасов по общепринятой методике (1)–(4) с использованием декадных биотермических коэффициентов дает ошибку большую, чем использование укосных биотермических коэффициентов, найденных методом подбора. Следовательно, в условиях неустойчивой естественной влагообеспеченности наиболее близкие к измеренным в поле результаты во-

добалансового расчета можно получить только после подбора значений биотермических коэффициентов с целью минимизации различий между рассчитанными и замеренными в поле почвенными влагозапасами.

Однако практика использования водобалансового расчета для управления поливами показывает, что не совсем удобно пользоваться декадными биотермическими коэффициентами, по которым расчет наиболее точен (среднеквадратичное отклонение составляет 7,9 мм). Причиной неудобства является то, что сроки проведения укосов по годам различаются, сдвигаясь на несколько суток в ту или иную сторону, часто со сменой номера декады. В зависимости от различных производственных обстоятельств может меняться даже количество укосов. В связи с этим, несмотря на рост ошибки водобалансового расчета в 1,5 раза, технологичнее пользоваться биотермическими коэффициентами, осредненными для всего вегетационного периода.

Исходя из этого замечания дополнительная оценка сделанных выводов и точности водобалансового расчета по вегетационным биотермическим коэффициентам, найденным методом подбора, проведена с использованием данных 2020 г. Поскольку наибольшие отклонения рассчитанных почвенных влагозапасов от замеренных в поле наблюдались на неорошаемом варианте (табл. 2 и 3), в схеме опыта 2020 г. было предусмотрено во всех вариантах исследований исключить орошение и вместо 3-укосного использования травостоя проводить укосы, моделируя разные способы заготовки корма из многолетних трав (сено, сенаж, зеленая масса на откорм при стойловом содержании крупного рогатого скота).

В 2020 г. наблюдалось сравнительно равномерное выпадение атмосферных осадков в течение вегетации. До конца июля почвен-

ные влагозапасы не опускались ниже 70 % от наименьшей влагоемкости (НВ) на всех трех вариантах опыта. Только к середине августа из-за отсутствия дождей влажность почвы понизилась до 0,5 НВ. Несмотря на условия 2020 г., отличавшиеся от условий 2017–2019 гг., согласно данным табл. 6, ошибка расчета динамики почвенных влагозапасов в 2020 г. находилась в пределах, установленных в предыдущие годы исследований при трехразовом скашивании. Наименьшее среднее квадратичное отклонение между рассчитанными и замеренными в поле почвенными влагозапасами наблюдалось при значении показателя  $\mu = 0,5$ . Причем ошибка водобалансового расчета в 2020 г. оказалась даже несколько меньшей, чем в среднем за 2017–2019 гг. Тем самым данные 2020 г. полностью подтвердили выводы, полученные по результатам исследований за 2017–2019 гг.

**Таблица 6. Сравнение среднеекватральных отклонений (мм), определяющих точность водобалансового расчета, выполненного по вегетационным биотермическим коэффициентам, найденным методом подбора**

Годы	Значения показателя $\mu$		
	0	0,5	1,0
2017	11,9	13,5	13,6
2018	15,2	12,8	12,2
2019	9,9	10,7	11,8
среднее за 2017–2019	12,3	12,3	12,5
2020	12,8	11,4	11,6
среднее за 2017–2020	12,4	12,1	12,3

### Заклучение

Результаты сравнения рассчитанных и замеренных в поле почвенных влагозапасов показали зависимость точности водобалансового расчета от способа определения декадных, укосных и вегетационных биотермических коэффициентов для многолетних трав.

Установлено следующее:

- расчет влагозапасов почвы по общепринятой методике с использованием декадных биотермических коэффициентов дает ошибку большую, чем аналогичный расчет по укосным биотермическим коэффициентам, найденным методом подбора, имеющего целью добиться минимальных различий

между рассчитанными и замеренными в поле почвенными влагозапасами. Следовательно, уточнение биотермических коэффициентов многолетних трав метода подбора является необходимым этапом в методике их определения;

- наибольшая точность водобалансового расчета достигается при осреднении максимальных температур воздуха за 5 предыдущих суток. При дальнейшем увеличении продолжительности периода осреднения максимальных суточных температур до 6–10 суток точность водобалансового расчета не повышается;

- ошибка расчета динамики почвенных влагозапасов по вегетационным биотермическим коэффициентам многолетних трав, найденным методом подбора, не зависит от количества укусов травостоя;
- наименьшее среднеквадратичное отклонение (между замеренными и вычисленными по подобранным вегетационным биотермическим коэффициентам) получено при значении показателя  $\mu = 0,5$ . Однако следует отметить, что в условиях орошения величина показателя  $\mu$  повышается.

### Библиографический список

1. Голченко, М. Г. Способы и устройства для совершенствования оперативного управления эксплуатационными режимами орошения дождеванием / М. Г. Голченко, Д. А. Емельяненко, Д. В. Яланский // Мелиорация. – 2016. – № 1. – С. 21–25.
2. Kowalczyk, A. An assessment of crop water deficits of the plants growing on the Malopolska Upland (Poland) / A. Kowalczyk, L. Labędzki, A. Kuźniar, M. Kostuch // Journ.of Water and Land Development. – 2016. – No. 29 (IV–VI). – P. 11–22. DOI: 10.1515/jwld-2016-0008.
3. Лихацевич, А. П. Расчет водного баланса почвы при краткосрочном переувлажнении / А. П. Лихацевич, И. А. Романов // Мелиорация. – 2016. – № 4. – С. 6–17.
4. Оросительные системы. Правила проектирования : ТКП/ПР 45-3.04–178–2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.
5. Усовершенствованный алгоритм управления орошением в производственных условиях / А. П. Лихацевич [и др.] // Современные методики, инновации и опыт практического применения : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 – 20 октября 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т мелиорации ; ред.: Н. К. Вахонин [и др.]. – Минск, 2017. – С. 30–40.
6. Плешаков, В. Н. Методика полевого опыта в условиях орошения / В. Н. Плешаков. – Волгоград : ВНИИОЗ, 1983. – 148 с.
7. Шеин, Е. Ф. Теория и методы физики почв / Е. Ф. Шеин, Л. О. Карпачевский. – М. : «Гриф и К», 2007. – 616 с.
8. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М. : Агропромиздат. 1986. – 416 с.
9. Опытное дело в полеводстве / Сост. Г. Ф. Никитенко. – М. : Россельхозиздат, 1982. – 176 с.

Поступила 5 февраля 2021 г.