

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА

С. В. Набздоров¹, старший преподаватель
А. П. Лихацевич², доктор технических наук
Г. В. Латушкина², кандидат технических наук

¹УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», г. Горки, Беларусь

²РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

Аннотация

Оценка точности расчета водопотребления (суммарного испарения, эвапотранспирации) сахарной свеклы с применением биоклиматического метода выполнена по биоклиматическим коэффициентам, вычисленным по формулам А. М. и С. М. Алпатьевых, А. И. Михальцевича и ТКП-45.304-178-2009 (02250), а также по биотермическим коэффициентам, вычисленным по среднесуточным и максимальным за сутки температурам воздуха. Установлено, что при использовании в водобалансовых расчетах биоклиматических коэффициентов сахарной свеклы, полученных из формулы А. М. и С. М. Алпатьевых, возможны большие ошибки при определении водопотребления (более 50 %). Осреднение за многолетие численных значений биоклиматических коэффициентов сахарной свеклы, полученных с применением формул А. И. Михальцевича и ТКП-45.304-178-2009 (02250), не приводит к столь большим ошибкам. Использование в водобалансовых расчетах биотермических коэффициентов сахарной свеклы, вычисленных по среднесуточным и максимальным температурам, дает наиболее точные результаты.

Ключевые слова: биоклиматический метод, биоклиматические коэффициенты, биотермические коэффициенты, водопотребление, ошибки расчета.

Abstract

S. V. Nabzdorov, A. P. Likhachevich, G. V. Latushkina

ASSESSMENT OF ACCURACY OF CALCULATION WATER CONSUMPTION OF SUGAR BEET USING BIOCLIMATIC METHOD

The assessment of the accuracy of calculating water consumption (total evaporation, evapotranspiration) of sugar beet using the bioclimatic method was carried out according to the bioclimatic coefficients calculated by the formulas of A. M. and S. M. Alpatiev, A. I. Mikhaltsevich and TKP-45.304-178-2009 (02250), as well as by biothermal coefficients calculated from the average daily and maximum daily air temperatures. It was found that when using in water balance calculations the bioclimatic coefficients of sugar beet obtained from the formula of A. M. and S. M. Alpatiev, big errors are possible in determining water consumption (more than 50 %). Averaging over many years of the numerical values of the bioclimatic coefficients of sugar beet, obtained using the formulas of A. I. Mikhaltsevich and TKP-45.304-178-2009 (02250), does not lead to such large errors. The use of sugar beet biothermal coefficients in water balance calculations, calculated from average daily and maximum temperatures, gives the most accurate results.

Keywords: bioclimatic method, bioclimatic coefficients, biothermal coefficients, water consumption, calculation errors.

Введение

При проектировании и эксплуатации оросительных систем важнейшее значение имеет точность определения водопотребления орошаемой культуры. Во-первых, от водопотребления орошаемого поля зависят дефицит водного баланса почвы и расчетная (проектная) нагрузка на дождевальную технику, что в конечном итоге определяет экономические показатели проекта орошения. Во-вторых, эффективность управления водным режимом почвы при проведении поливов на эксплуатируемых оросительных системах обусловлена

также точностью определения текущего водопотребления.

Среди методов расчета водопотребления (суммарного испарения, эвапотранспирации) сельскохозяйственных культур наибольшее распространение на постсоветском пространстве получил так называемый биоклиматический метод, который был разработан в СССР А. М. Алпатьевым и С. М. Алпатьевым в 1960-х гг. [1–6]. Авторами показано, что водопотребление растений тесно коррелирует с температурой, влажностью и дефицитом влажности воздуха, штатно измеряемыми на метеостанциях.

После детального изучения возможной структуры расчетной зависимости в качестве основного метеопказателя был выбран вычисляемый по температуре и влажности воздуха среднесуточный дефицит влажности воздуха, который комплексно характеризует испаряющую способность приземного слоя атмосферы. Водопотребление сельскохозяйственных культур было предложено определять по формуле

$$E_i = K_{di} \sum d_i, \quad (1)$$

где K_{di} – биоклиматический (биологический) коэффициент водопотребления, вычисленный по дефицитам влажности воздуха и изменяющийся в течение вегетации (по i -м периодам заданной продолжительности) по характерной для каждого вида растений кривой, мм/мб;

$\sum d_i$ – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха за рассматриваемый i -й период, мб.

Изменение биоклиматических коэффициентов в течение вегетации учитывает динамику водопотребления по стадиям развития растений. Авторы формулы (1) отмечали, что она приемлема исключительно при условиях достаточной увлажненности почвы и относительно высоком урожае культуры, когда водопотребление ограничивается только теплоэнергетическими ресурсами и дальнейший рост урожайности не сопровождается существенным ростом потребности в воде.

В процессе использования данной формулы в водобалансовых расчетах установлено, что метод А. М. и С. М. Алпатьевых имеет существенный недостаток, который заключается в изменчивости биоклиматических коэффициентов не только по регионам, но даже в пределах одной зоны по годам в зависимости от погодных условий. Для снижения вариабельности биоклиматических коэффициентов А. И. Михальцевичем было предложено в условиях Беларуси заменить линейную эмпирическую зависимость водопотребления растений от дефицитов влажности воздуха на степенную, что позволяет существенно снизить зональную и погодно-климатическую вариацию биоклиматических коэффициентов [7]:

$$E_i = 1,74 n K_{di} d_i^{0,4}, \quad (2)$$

где 1,74 – эмпирический коэффициент;
 n – число суток в расчетном периоде;

K_{di} – биоклиматический коэффициент, вычисленный по дефицитам влажности воздуха, мм/мб;

d_i – среднесуточный дефицит влажности воздуха за расчетный период, мб.

Сравнительный анализ (1) и (2) показал, что расчетная зависимость (2) является более обоснованной [8]. С целью упрощения алгоритма расчета формула (2) была несколько трансформирована и для условий Республики Беларусь предложена формула, вошедшая в нормативный документ (ТКП-45.304-178-2009 (02250) [9]:

$$E_i = 1,35 n_i K_{di} d_i^{0,5}, \quad (3)$$

где n_i – количество суток в i -й декаде;

K_{di} – биоклиматический коэффициент за i -ю декаду, вычисленный по дефицитам влажности воздуха, мм/мб;

d_i – среднесуточное значение дефицита влажности воздуха за i -ю декаду, мб/сут.

Помимо (3), были разработаны и другие модификации формулы (2). Например, для определения водопотребления орошаемых многолетних бобовых трав В. И. Вихровым предложена эмпирическая зависимость, которая, кроме дефицита влажности воздуха, учитывает скорость ветра и прогнозную урожайность [10]:

$$E_i = n_i K_{di} d_i^{0,64} (1 + V_2)^{0,42} K_y, \quad (4)$$

где n_i – число суток в расчетном i -м периоде, сут;

K_{di} – биоклиматический коэффициент в i -м периоде, вычисленный по дефицитам влажности воздуха;

d_i – среднесуточный дефицит влажности воздуха за расчетный i -й период, мб;

V_2 – среднесуточная за период скорость ветра на высоте 2 м в i -м периоде, м/с;

K_y – параметр, учитывающий уровень урожайности (продуктивность) орошаемых трав в данном укосе.

При расчете водопотребления в Нечерноземной зоне России Н. В. Данильченко рекомендовал применять обобщенную формулу [11]:

$$E = E_0 K_d K_0, \quad (5)$$

где E_0 – испаряемость; K_0 – микроклиматический коэффициент, учитывающий размеры орошаемого участка и участие орошения в изменении микроклимата.

Результаты исследований и их обсуждение

В каждой из вышеприведенных формул (1)–(5) водопотребление сельскохозяйственной культуры прямо пропорционально биоклиматическому коэффициенту. Это означает, что ошибки в установлении величины данного коэффициента в той же пропорции повторяются и при вычислении водопотребления. Из этого следует, что чем теснее связь между декадными биоклиматическими коэффициентами, установленными по данным конкретного года, и расчетными биоклиматическими коэффициентами, осредненными по тем же декадам за многолетие, тем точнее будет определено водопотребление сельскохозяйственной культуры в конкретном году.

Ранее в Беларуси биоклиматические коэффициенты водопотребления сахарной свеклы не определялись. Сейчас появилась возможность их расчета по результатам полевого опыта с орошением сахарной свеклы, проведенного нами в 2017–2019 гг. на оросительном полигоне БГСХА «Тушково». Соответствующие вычисления выполнены по вариантам опыта в соответствии с формулами (1)–(3) обратным счетом.

Биоклиматические коэффициенты сахарной свеклы по дефицитам влажности воздуха, рассчитанные по формуле (1), демонстрируют значительные вариации декадных коэффициентов по годам исследований и вариантам опыта (рис. 1а). Например, начиная с 3-й декады мая и по 3-ю декаду июля отклонение коэффициентов по годам от среднемноголетних значений превышает 1,4–1,7 раза, что, соответственно, вызывает большие расхождения в водобалансовых расчетах. Поэтому на рис. 1а показаны невысокие коэффициенты детерминации связи между декадными биоклиматическими коэффициентами сахарной свеклы (K_{6i} и $K_{6cp.}$) со 2-й декады мая по конец августа (в пределах 0,4–0,5).

В свою очередь, значения биоклиматических коэффициентов, вычисленных по дефицитам влажности воздуха в соответствии с формулой А. И. Михальцевича, изменчивы, но незначительно. Аналогичный вывод следует и для коэффициентов, вычисленных по формуле ТКП. Коэффициенты детерминации связи между декадными биоклиматическими коэффициентами водопотребления сахарной

свеклы, вычисленными по формулам (2), (3) в годы исследований (K_{ai}), и средними за 2017–2019 гг. ($K_{acp.}$) изменяются в пределах 0,6–0,7 (рис. 1б и 1в). Это дает возможность рекомендовать методики А. И. Михальцевича и ТКП-45.304-178-2009 (02250) к производственному применению.

Отметим, что при расчете водопотребления орошаемых сельскохозяйственных культур в качестве показателя, характеризующего метеорологические условия, часто используют температуру воздуха. Ранее было экспериментально доказано, что имеет место тесная корреляция между декадным водопотреблением орошаемых культур и суммарной за расчетный период среднесуточной температурой воздуха [12, 13]. Приемлемой для вычислений оказалась простейшая формула:

$$E_i = K_t \sum t_i, \quad (6)$$

где K_t – биотермический коэффициент, вычисленный по среднесуточным температурам воздуха за i -й период, мм/°С;

$\sum t_i$ – сумма среднесуточных температур воздуха за i -й период, °С.

В качестве фактора, управляющего процессом водопотребления, предлагаем использовать максимальную за сутки температуру воздуха, поскольку этот метеопараметр не только достаточно точно отражает влияние испаряющей способности приземного слоя атмосферы на растения, но и наиболее легко контролируется в производственных условиях, что особенно важно для управления орошением при эксплуатации оросительных систем. Биологические особенности развития культур здесь учитываются соответствующими биотермическими коэффициентами, рассчитанными по максимальным за сутки температурам воздуха. Биотермические коэффициенты, как и в формулах Алпатьевых, Михальцевича и ТКП-45.304-178-2009 (02250), определялись обратным счетом. Например, для максимальной температуры

$$K_{mi} = E_i / \sum t_{mi}, \quad (7)$$

где K_{mi} – биотермический коэффициент, вычисленный по максимальным температурам воздуха i -го периода, мм/°С;

$\sum t_{mi}$ – сумма суточных максимальных температур воздуха за i -й период, °С.

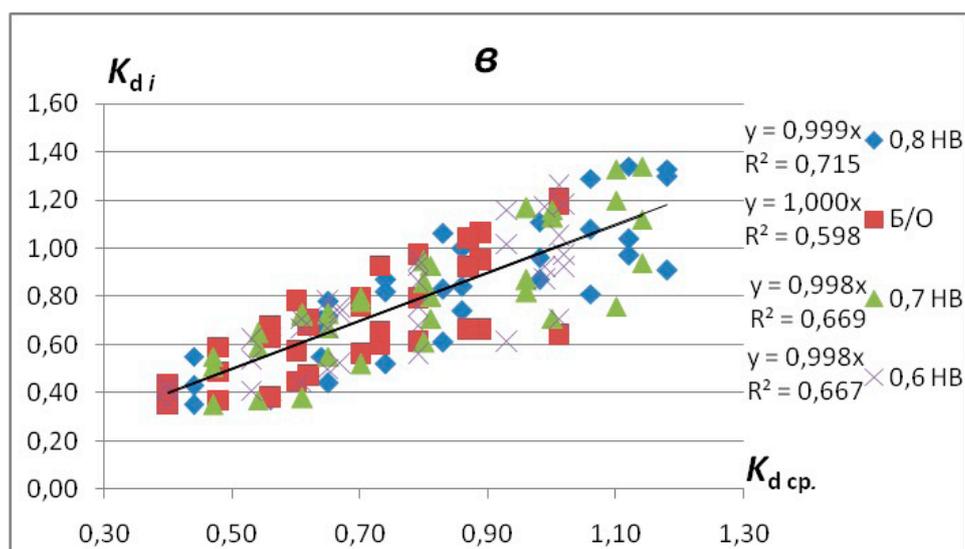
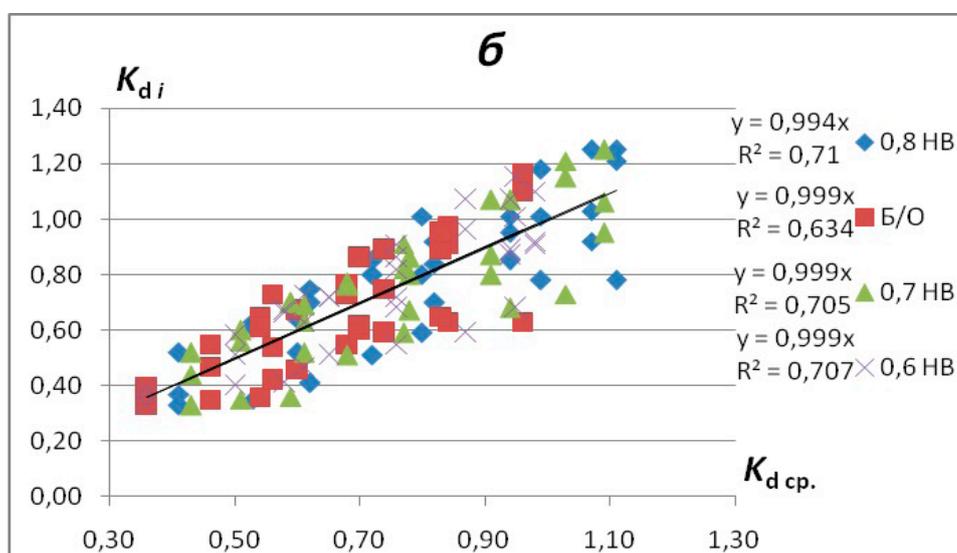
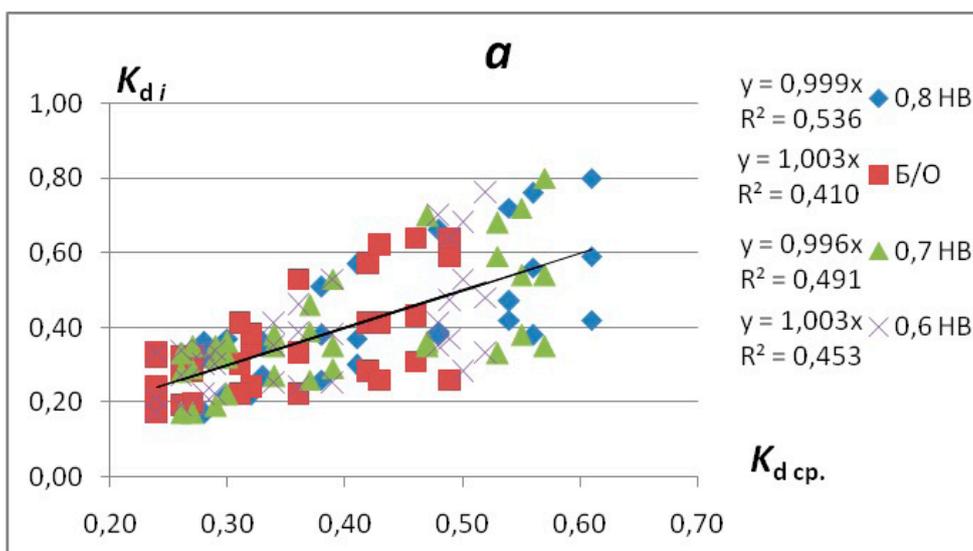


Рис. 1. Графики связи между декадными биоклиматическими (K_{di}) коэффициентами водопотребления сахарной свеклы по годам исследований и средними за 2017–2019 гг. коэффициентами ($K_{d\text{ cр.}}$): а – вычисленными по (1); б – по (2); в – по (3)

Биотермические коэффициенты сахарной свеклы, вычисленные по среднесуточным и максимальным температурам, меняются по декадам в диапазоне от 0,09 до 0,28 мм/°С (рис. 2а). Для максимальных температур этот диапазон несколько меньше: от 0,05 до 0,20 мм/°С (рис. 2б).

Таким образом, установлено, что годовые и средние за три года значения декадных биотермических коэффициентов, рассчитанных по максимальным и среднесуточным температурам, имеют между собой достаточно тесную связь. Полученные результаты хорошо согласуются с данными для других культур [14–15].

В таблице представлена обобщенная оценка точности результатов расчета биоклиматических и биотермических коэффициентов водопотребления сахарной свеклы, полученных по разным методикам. Как следует из данных таблицы, методика Алпатьевых непригодна для определения водопотребления сахарной свеклы в Беларуси вследствие самых больших ошибок в расчетах. Другие методики дают более приемлемые результаты с коэффициентами детерминации округленно в пределах от 0,6 до 0,8.

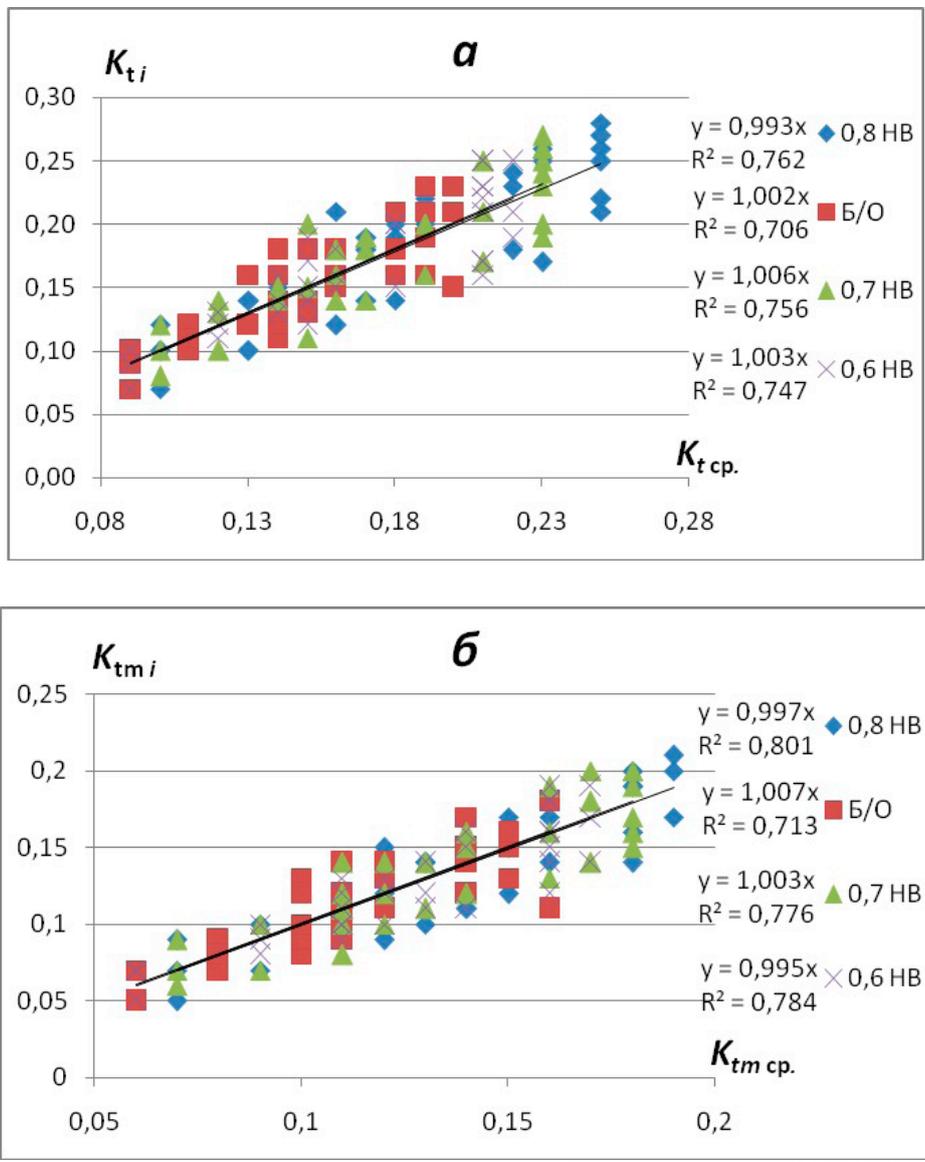


Рис. 2. Графики связи между декадными биотермическими (K_{ti} , K_{tmi}) коэффициентами водопотребления сахарной свеклы по годам исследований и средними за 2017–2019 гг. ($K_{tср.}$, $K_{tmср.}$): а – по среднесуточным температурам воздуха; б – по максимальным температурам воздуха за сутки

Таблица. Коэффициенты детерминации (R^2) связи между декадными в каждом году и декадными средними за 2017–2019 гг. биоклиматическими и биотермическими коэффициентами водопотребления

Варианты опыта	Варианты расчета водопотребления сахарной свеклы				
	по дефицитам влажности воздуха			по температурам воздуха	
	Алпатьевы	Михальцевич	ТКП	среднесут.	максимальные
Без орошения	0,54	0,71	0,72	0,76	0,80
60 % НВ	0,41	0,63	0,60	0,71	0,71
70 % НВ	0,49	0,71	0,67	0,76	0,78
80 % НВ	0,45	0,71	0,67	0,75	0,78
Пределы измен.	0,41–0,54	0,63–0,71	0,60–0,72	0,71–0,76	0,71–0,78
Средний R^2	0,47	0,69	0,66	0,74	0,77

Заметим, что согласно полученным коэффициентам детерминации (R^2) связи между декадными в каждом году и декадными средними за 2017–2019 гг. биоклиматическими коэффициентами лучший результат зафиксирован на вариантах без орошения и

с оптимальным режимом поливов (70 % НВ). Следовательно, текущая влагообеспеченность культуры не влияет на точность расчета водопотребления сахарной свеклы по установленным биоклиматическим и биотермическим коэффициентам.

Заключение

При использовании в водобалансовых расчетах биоклиматических коэффициентов сахарной свеклы, вычисленных по формуле А. М. и С. М. Алпатьевых, возможны большие ошибки (более 50 %). Это подтверждают коэффициенты детерминации взаимосвязи между декадными коэффициентами по годам и средними за многолетие, колеблющиеся в пределах 0,41–0,54.

Осреднение численных значений декадных биоклиматических коэффициентов сахарной свеклы, полученных с использованием формулы А. И. Михальцевича, не приводит к столь большим ошибкам. Аналогичный вывод справедлив и для коэффициентов, вычисленных по формуле ТКП. Коэффициенты детерми-

нации связи между декадными биоклиматическими коэффициентами водопотребления сахарной свеклы, рассчитанными для каждого года по формулам Михальцевича и ТКП, изменяются в пределах 0,6–0,7, что дает возможность применять эти методики на практике.

Использование в водобалансовых расчетах биотермических коэффициентов сахарной свеклы, вычисленных по среднесуточным и максимальным температурам, дает наиболее точные результаты. Достаточно высокие коэффициенты детерминации связи между декадными биотермическими коэффициентами (0,7–0,8) позволяют рекомендовать данные методики расчета водопотребления сахарной свеклы к практическому применению.

Библиографический список

1. Алпатьев, А. М. Биофизические основы водопотребления орошаемых культур / А. М. Алпатьев // Орошаемое земледелие в Европейской части СССР : Респ. межвед. темат. науч. сб. / УкрНИИГиМ. – Киев, 1965. – Вып. 2. – С. 15–17.
2. Алпатьев, А. М. Водопотребление культурных растений и климат / А. М. Алпатьев // Режим орошения сельскохозяйственных культур. – М. : Колос, 1965. – С. 55–68.
3. Алпатьев, А. М. Влагооборот культурных растений / А. М. Алпатьев. – Л. : Гидрометеиздат, 1954. – 248 с.
4. Алпатьев, С. М. Поливной режим сельскохозяйственных культур в южной части Украины : докл.-реф. дис. ... д-ра с.-х. наук / С. М. Алпатьев. – Киев, 1965. – 88 л.

5. Алпатьев, С. М. Расчет и корректировка режимов орошения сельскохозяйственных культур / С. М. Алпатьев // Вод. хозяйство : сб. науч. тр. / УкрНИИГиМ. – Киев : Урожай, 1965. – Вып. 1. – С. 55–68.
6. Алпатьев, С. М. К обоснованию формирования поливных режимов с использованием биоклиматического метода расчета суммарного испарения / С. М. Алпатьев, В. П. Остапчик // Мелиорация и вод. хозяйство : сб. науч. тр. / УкрНИИГиМ. – Киев : Урожай, 1971. – Вып. 19. – С. 3–17.
7. Михальцевич, А. И. О совершенствовании биоклиматического метода расчета испарения с орошаемых полей / А. И. Михальцевич // Мелиорация переувлажненных земель : сб. науч. тр. / Белорус. НИИ мелиорации и вод. хозяйства. – Минск : Ураджай, 1979. – Т. XXVII. – С. 42–46.
8. Лихацевич, А. П. Оценка факторов, формирующих неустойчивую влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в гумидной зоне (на примере Беларуси, Центрального и Волго-Вятского районов Российской Федерации) / А. П. Лихацевич, Е. А. Стельмах. – Минск : ООО «Полирек», 2002. – 212 с.
9. Оросительные системы. Правила проектирования : ТКП 45-3.04-178-2009 (02250). – Введ. 29.12.2009 г. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 72 с.
10. Голченко, М. Г. Расчет суточного водопотребления многолетних трав / М. Г. Голченко, В. И. Вихров // Гидротехника и мелиорация. – 1985. – № 7. – С. 32–38.
11. Данильченко, Н. В. Биоклиматическое обоснование суммарного водопотребления и оросительных норм / Н. В. Данильченко // Мелиорация и вод. хозяйство. – 1999. – № 4. – С. 25–29.
12. Усовершенствованный алгоритм управления орошением в производственных условиях / А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина, И. А. Романов, С. В. Набздоров / Мелиорация: современные методики, инновации и опыт практического применения : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 окт. 2017 г. / РУП «Институт мелиорации» ; редкол.: Н. К. Вахонин [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2017. – С. 30–40.
13. Рекомендации по управлению дождеванием в производственных условиях / А. С. Анженков [и др.]. – Минск : РУП «Институт мелиорации», 2020. – 40 с.
14. Михальцевич, А. И. Режим орошения культурных пастбищ на торфяноглеевых почвах Полесья / А. И. Михальцевич, К. С. Пантелей, Н. Я. Гриневич // Мелиорация переувлажненных земель : сб. науч. тр. Белорус. НИИ мелиорации и вод. хозяйства / БелНИИМивХ. – Минск : Ураджай, 1976. – Т. XXIV. – С. 98–110.
15. Алехин, А. В. Влияние орошения и числа скашиваний на продуктивность бобово-злаковых травосмесей в условиях северо-востока Республики Беларусь : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.02 / А. В. Алехин. – Горки, 1999. – 136 л.

Поступила 10 февраля 2022 г