

УДК 631.432.21:633.18

DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-72-91

**Г. Т. Балакай, Р. Е. Юркова, Л. М. Докучаева, В. Иг. Ольгаренко,
Т. С. Пономаренко**

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

К ПРОБЛЕМЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАСЧЕТОВ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ РИСА

Цель исследований – составить алгоритм и получить необходимые зависимости и уравнения, позволяющие разработать программу для электронно-вычислительной машины (ЭВМ) и автоматизировать процессы расчета эвапотранспирации риса, в т. ч. испарения с водной поверхности рисового чека и транспирации риса. В процессе работы использованы данные, которые были получены в ходе проведения полевых экспериментальных исследований на опытных участках объектов-представителей по возделыванию риса (ООО «Маныч-Агро», Багаевский район, Ростовская область) и исследований в лизиметрах, установленных на полигоне Российского научно-исследовательского института проблем мелиорации. Алгоритмы расчетов эвапотранспирации рисового поля были разработаны и реализованы в программной среде Microsoft Office Excel. Зависимости получены методом регрессионного анализа. В результате исследований выявлена динамика среднесуточной транспирации риса от всходов до созревания в зависимости от суммы среднесуточных температур, определен биоклиматический коэффициент транспирации для риса в связи с суммой температур нарастающим итогом, установлен поправочный коэффициент на испарение с водной поверхности чека, занятого рисом. Представленные выше данные позволили разработать алгоритм расчета эвапотранспирации рисового поля, включающего расчет испаряемости с водной поверхности рисового чека и транспирации риса с использованием информационной базы данных метеопараметров. Алгоритм расчета эвапотранспирации рисового поля дает основание для разработки программы для ЭВМ, что позволит автоматизировать процессы расчета эвапотранспирации риса, в т. ч. испарения с водной поверхности рисового чека и транспирации риса.

Ключевые слова: суммарное водопотребление, испарение, транспирация, эвапотранспирация, рис, алгоритм, почвенно-климатические условия, дефицит влажности воздуха.

**G. T. Balakai, R. E. Yurkova, L. M. Dokuchaeva, V. Ig. Olgarenko,
T. S. Ponomarenko**

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, NovoCherkassk,
Russian Federation

ON ISSUE OF AUTOMATION OF RICE EVAPOTRANSPIRATION CALCULATION PROCESS

The purpose of the research is to create the algorithm and obtain the necessary dependencies and equations allowing to develop a program for an electronic computing machine and to computerize the calculation of rice evapotranspiration, including evaporation from the water surface of a rice paddy and rice transpiration. The data obtained during the field research on the experimental plots of the proxy objects for rice cultivation (LLC “Manych-

Agro”, Bagaevskiy district, Rostov region) and research in lysimeters installed at the test site of the Russian Scientific Research Institute for Land Improvement Problems were used in the course of work. The calculation algorithms for rice paddy evapotranspiration have been developed and implemented in the Microsoft Office Excel software environment. The dependencies were obtained by regression analysis. As a result of studies, the dynamics of average daily rice transpiration from seedling stage to ripening depending on the sum of average daily temperatures was found, the bioclimatic transpiration coefficient for rice due to the sum of temperatures on the cumulative total was determined, the correction coefficient for evaporation from rice paddy water surface was determined. The above presented data allowed developing an algorithm for calculating the rice field evapotranspiration, including the calculation of evaporation from the water surface of the rice paddy and rice transpiration using the information database of meteorological parameters. The algorithm for calculating rice field evapotranspiration provides the basis for developing a computer program that will computerize the processes for calculating rice evapotranspiration, including evaporation from the water surface of a rice paddy and rice transpiration.

Key words: consumptive water use, evaporation, transpiration, evapotranspiration, rice, algorithm, soil and climate conditions, deficit of air humidity (moisture).

Введение. На водопотребление сельскохозяйственных культур оказывает влияние множество биотических и абиотических факторов, поэтому суммарное водопотребление подвержено большим колебаниям как по фазам роста и развития растений, так и от воздействия климатических и почвенных условий, мелиоративного состояния орошаемых земель.

На сегодняшний день существуют методы определения суммарного водопотребления на основе многолетних полевых и лабораторных исследований и расчетные методы [1–7]. Наиболее точными являются полевые исследования с инструментальным измерением всех статей поступления и расхода влаги. Как отмечено в книге «Мелиорация и водное хозяйство» (1999), «...суммарное водопотребление – функция влажности почвы, физиологических свойств растений, метеорологических условий и уровня агротехники» [8]. В связи с этим нормы водопотребления устанавливаются для конкретных условий территории на основании многолетних полевых и лабораторных исследований по известным общепринятым методикам [9–12]. Современные расчетные методы определения водопотребления сельскохозяйственных растений основаны на решении уравнения водного баланса корнеобитаемого слоя почвы [8, 13]:

$$M = E - X - (W_n - W_k) - K,$$

где M – оросительная норма, мм;

E – суммарное водопотребление за период вегетации, мм;

X – количество полезных осадков, мм;

W_n – запас почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвы в период посева, мм;

W_k – то же в период уборки урожая, мм;

K – количество воды, используемой растениями за счет подпитывания грунтовыми водами, мм.

Наиболее распространенными методами определения эвапотранспирации за рубежом являются методы Х. Л. Пенмана, Л. Тюрка, Х. Ф. Бейли – В. Д. Кридлапа и др. [8, 14, 15]. Исследования ученых ЮжНИИГиМ показали, что наиболее распространенными методами, применяемыми в России, являются методы С. М. Алпатьева, Н. Н. Иванова, И. А. Шарова, Д. А. Штойко, А. Р. Константинова, Н. В. Данильченко и др. [16–21]. Сравнение результатов расчетов и данных, полученных инструментальными измерениями в полевых исследованиях, показало, что наибольшую их сходимость можно получить при использовании в расчетах региональных биоклиматических коэффициентов, полученных на основе многолетних исследований с учетом агрометеопараметров [22–24].

При определении эвапотранспирации расчетными методами за основу рекомендуется принимать «...испаряемость, скорректированную коэффициентами, учитывающими значение растений и климата в испарении влаги орошаемым полем» [8].

Для планирования водоподачи на орошаемое поле помимо агроклиматических показателей конкретных территорий необходимо знать закономерности водопотребления сельскохозяйственных культур в полевых севооборотах. Вопросами установления оптимального режима орошения и водопотребления сельскохозяйственных культур занималось большинство НИИ и вузов сельскохозяйственного направления, имеющих мелиоративные систе-

мы и орошаемые или осушаемые земли, в т. ч. и ЮжНИИГиМ [25]. Поэтому в научной литературе имеется множество данных об особенностях водопотребления сельскохозяйственных культур в полевых севооборотах, полученных на основании многолетних исследований в различных агроклиматических условиях России [11, 26, 27]. На основе обобщения и анализа этих данных в 2017 г. ФГБНУ «ВНИИ «Радуга» и ФГБНУ «РосНИИПМ» разработаны и утверждены «Укрупненные нормы водопотребности для орошения сельскохозяйственных культур Центрального, Приволжского, Уральского, Сибирского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов» [28]. Однако культура риса в этом нормативном документе отсутствует в связи с тем, что рисовые оросительные системы (РОС) имеют свои функциональные особенности как по устройству, так и по эксплуатации. И, главное, в большинстве случаев рис в России возделывается в чеках и поливается эта культура способом затопления. В связи с большой трудоемкостью и сложностью проведения воднобалансовых исследований на РОС, посвященных изучению норм водопотребности риса и водоотведения с оросительных систем, такие исследования проводились чаще фрагментарно с частичным учетом водного баланса, это не позволяет в достаточной мере обобщить данные и разработать востребованные производством нормативы водопотребности и водоотведения.

Поливной режим риса имеет свои особенности, связанные: с биологией риса – повышенной потребностью растений в воде, а в некоторые фазы роста и развития – в воздухе, например в период всходов и кущения; агроклиматическими условиями; почвенно-мелиоративным состоянием земель РОС; наличием водных ресурсов и др.

Основной и самой сложной задачей в воднобалансовых исследованиях является учет воды, расходуемой растениями риса на транспирацию и испарение с водной поверхности. Другие составляющие водного баланса можно учитывать инструментально или рассчитать на основе знания показателей почвенно-мелиоративного состояния земель РОС.

В ФГБНУ «РосНИИПМ» начаты работы по обобщению данных исследований, ранее проводимых в ЮжНИИГиМ [29], и исследований 2018 г., посвященных изучению отдельных элементов водного баланса рисового поля, для разработки нормативов водопотребления риса и водоотведения с РОС. Исследования проводились в ООО «Маньч-Агро» Багаевского района Ростовской области и в лизиметрах на опытном полигоне РосНИИПМ. Основные результаты исследования особенностей эвапотранспирации приведены ранее [30].

Цель исследований – составить алгоритм и получить необходимые зависимости и уравнения, позволяющие разработать программу для ЭВМ и автоматизировать процессы расчета эвапотранспирации риса и испарения с водной поверхности рисового чека.

Методы и материалы. Для разработки алгоритма автоматизированного расчета эвапотранспирации использованы данные, которые были получены в ходе проведения полевых экспериментальных исследований на опытных участках объектов-представителей по возделыванию риса (ООО «Маньч-Агро», Багаевский район, Ростовская область) и исследований в лизиметрах, установленных на полигоне ФГБНУ «РосНИИПМ». Алгоритмы расчетов эвапотранспирации рисового поля были разработаны и реализованы в программной среде Microsoft Office Excel. Зависимости получены методом регрессионного анализа.

Результаты исследований. В отличие от полевых культур, у которых эвапотранспирация складывается из суммы показателей транспирации и испарения с поверхности почвы, причем влажность на поверхности почвы может изменяться от 60 до 100 % НВ, у риса при затоплении чеков водой испарение происходит с водной поверхности и в значительно больших размерах, чем из сухого верхнего слоя почвы в полевых условиях.

Изучение научной литературы и собственные исследования показали, что более точные данные о транспирации риса и испаряемости с водной поверхности можно получить при многолетних исследованиях с ин-

струментальным измерением этих показателей. Однако для автоматизации процессов расчета транспирации и испарения необходимо данные, полученные путем инструментальных измерений и представленные в табличной форме, перевести на язык математики, т. е. получить достоверные зависимости, и на их основе разработать алгоритм расчета эвапотранспирации рисового поля (рисунок 1).

На основании алгоритма в последующем разработали программу для ЭВМ для расчета эвапотранспирации риса и составляющих элементов: транспирации риса и испаряемости с водной поверхности чека.

При разработке алгоритма расчета эвапотранспирации риса нами для вычисления испаряемости (потенциальной эвапотранспирации) использовалась модифицированная профессором Н. В. Данильченко формула Н. Н. Иванова [8], которая приняла следующий вид, мм:

$$E = k_t \cdot d_{\varphi} \cdot f(v) \cdot k_{\check{c}},$$

где E – испаряемость (потенциальная эвапотранспирация), мм;

k_t – энергетический фактор испарения, мм/мбар;

d_{φ} – дефицит влажности воздуха, мбар;

$f(v)$ – функция, учитывающая влияние скорости ветра;

$k_{\check{c}}$ – поправочный коэффициент на испарение с водной поверхности чека с растущим рисом.

Энергетический (температурный) фактор k_t , учитывающий нелинейность связи E и d_{φ} при изменении температуры воздуха, определяем по зависимости:

$$k_t = k_{tp} / l_a,$$

где $k_{tp} = 0,0061 \cdot (25+t)^2$ – температурный режим, °С;

t – температура воздуха, °С;

l_a – упругость насыщенного пара, соответствующая этой температуре, мбар.

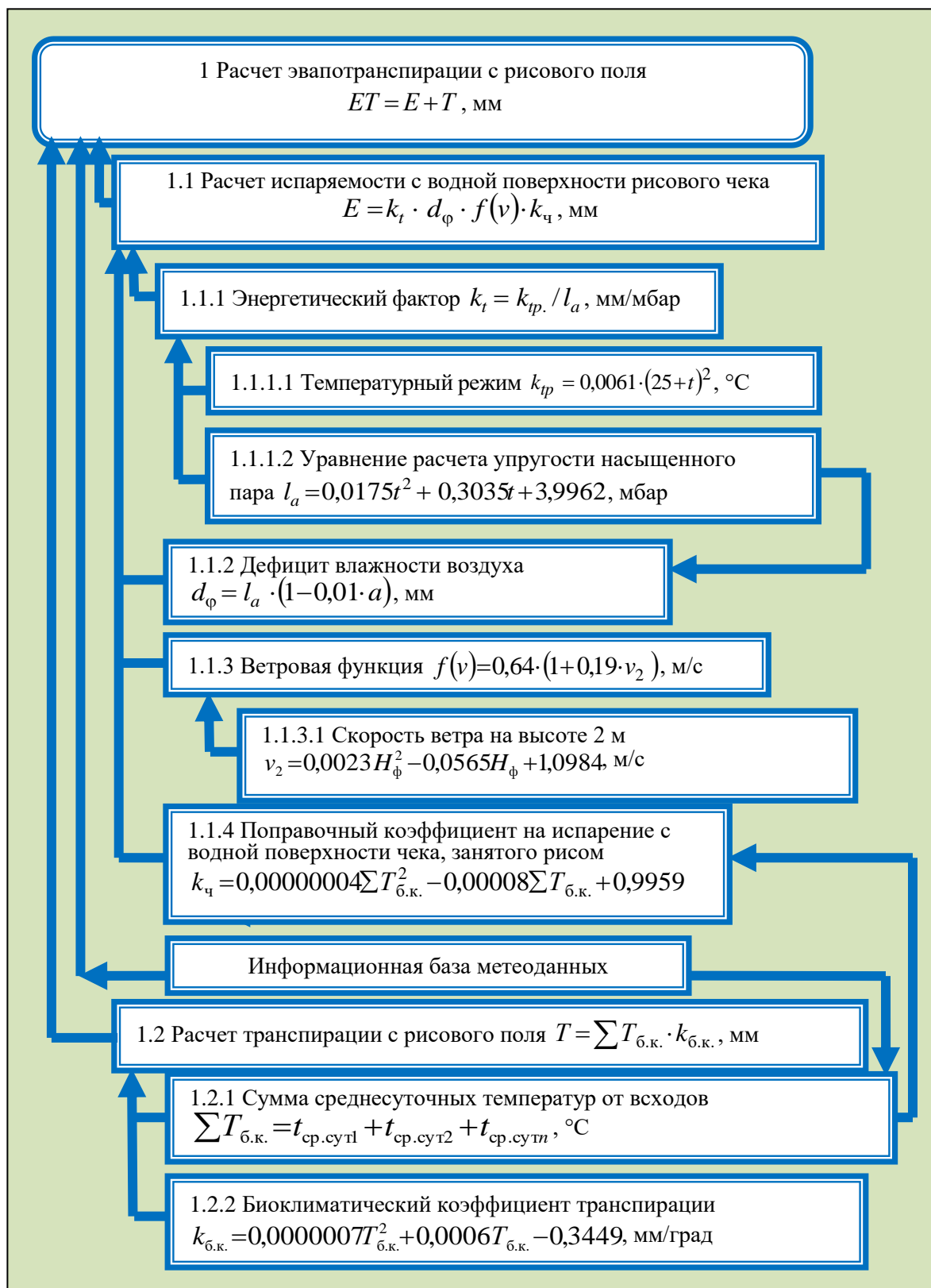


Рисунок 1 – Алгоритм расчета эвапотранспирации рисового поля

Упругость насыщенного пара, соответствующая этой температуре, рассчитывалась по полученной нами кривой напряжения водяных паров в миллиметрах ртутного столба в зависимости от температуры воздуха.

Далее для соблюдения единства измерений в уравнениях и для возможности расчетов было получено уравнение для перевода упругости напряжения водяных паров в зависимости от температуры воздуха из миллиметров ртутного столба в миллибары (рисунок 2), мбар:

$$l_a = 0,0175t^2 + 0,3035t + 3,9962.$$

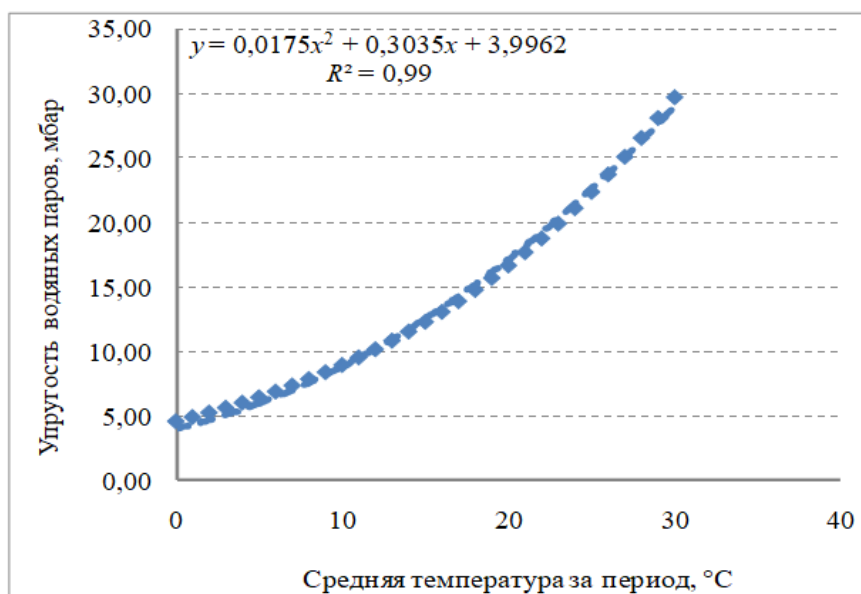


Рисунок 2 – Кривая упругости насыщенного пара в зависимости от температуры воздуха, в миллибарах

Дефицит влажности воздуха (упругости насыщения) d_ϕ , мбар, при отсутствии данных наблюдений определяется по уравнению [8]:

$$d_\phi = l_a \cdot (1 - 0,01 \cdot a),$$

где a – относительная влажность воздуха, %.

Ветровая функция $f(v)$ определяется по уравнению:

$$f(v) = 0,64 \cdot (1 + 0,19 \cdot v_2),$$

где v_2 – скорость ветра на высоте 2 м от поверхности земли, м/с.

Для перехода от флюгерной скорости ветра на наблюдаемой высоте H_ϕ к расчетной скорости ветра v_2 на высоте 2 м получена кривая коэффициента перевода (рисунок 3) и следующее уравнение, м/с:

$$v_2 = 0,0023H_\phi^2 - 0,0565H_\phi + 1,0984.$$

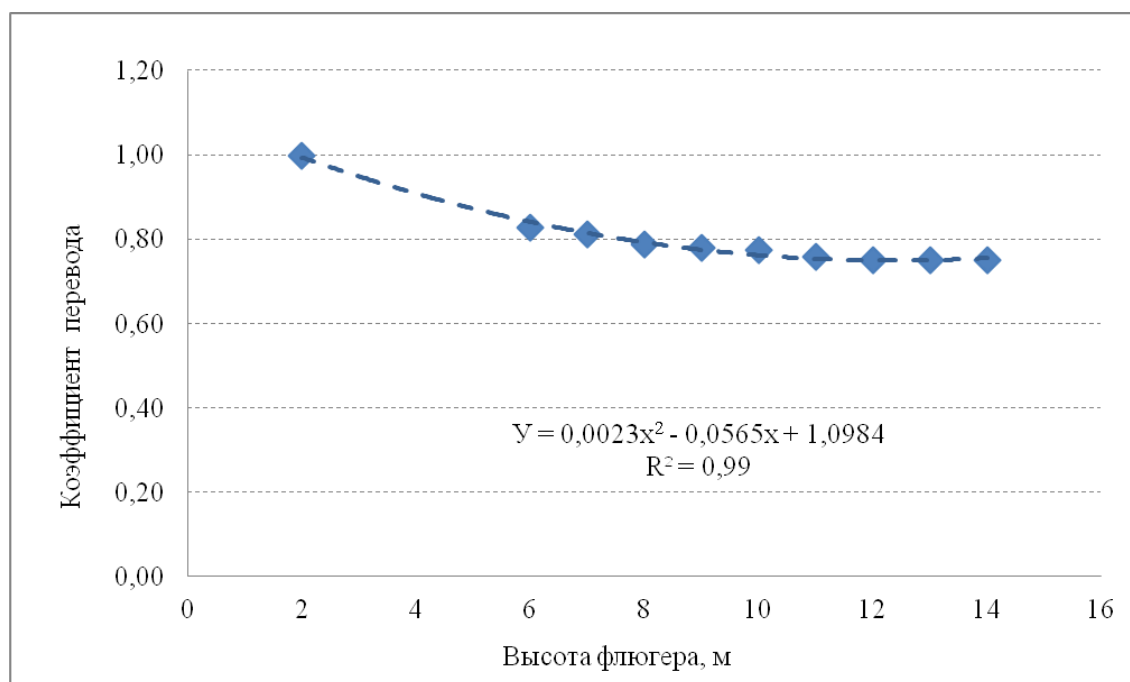


Рисунок 3 – Уравнение для перевода скорости ветра от флюгерной (наблюдаемой) к расчетной на высоте 2 м

Особенностью суммарного испарения с рисового чека является то, что для получения всходов риса приходится производить напуск воды в чек, необходимый для первоначального насыщения почвы. Этот объем воды учитывается в составе оросительной нормы, и расчет испарения необходимо начинать с момента первого заполнения чека, а транспирации – с момента получения полных всходов через 15–20 дней после посева в зависимости от температурного режима.

Для оценки динамики эвапотранспирации риса необходимо знать закономерности изменения показателей транспирации растений в зависимости от фазы роста и периода их развития. Для расчета транспирации нами проводились инструментальные исследования в лизиметрах на опытном полигоне ФГБНУ «РосНИИПМ» и в полевых условиях на Нижне-Маньчской РОС.

Изучение динамики водопотребления риса показало, что среднесуточная транспирация риса возрастает с 6,2 мм/сут в фазе полных всходов до 13,5 мм/сут в период выметывания и цветения и снижается к фазе созревания до 4,2 мм/сут (рисунок 4).

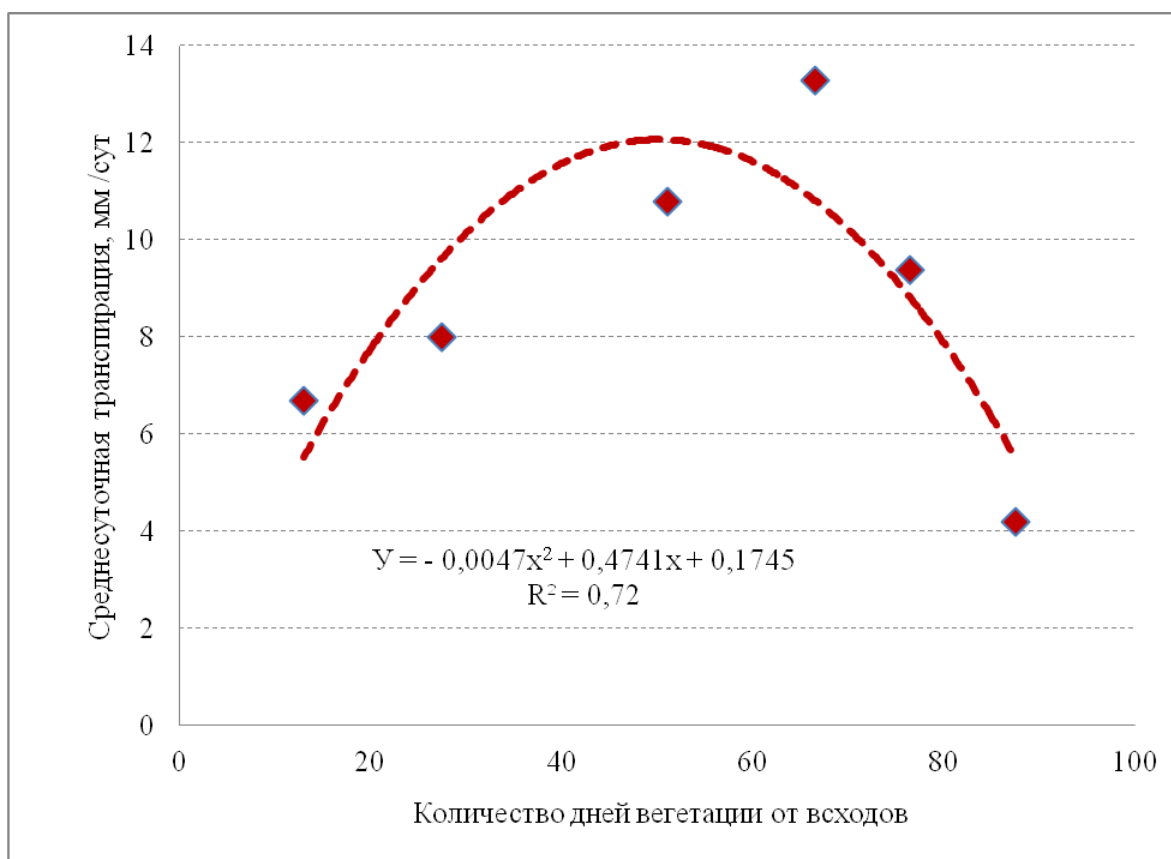


Рисунок 4 – Динамика среднесуточной транспирации риса от всходов до созревания, лизиметры, 2018 г.

Кривая изменения транспирации риса описывается уравнением (полиномом второй степени) $Y_T = -0,0047x^2 + 0,4741x + 0,1745$ при высоком коэффициенте аппроксимации $R^2 = 0,72$.

Для характеристики транспирации показательны кривые нарастания суммарной транспирации риса от всходов до созревания, полученные после обработки данных исследований в лизиметрах и в полевых условиях (рисунок 5).

Однако для разработки программы для ЭВМ большой интерес вызывают математически обработанные данные о транспирации во взаимосвязи с такими метеопараметрами, как дефицит влажности воздуха и температурный режим. Наиболее практичными для производственных структур являются связи между транспирацией и суммами среднесуточных температур нарастающим итогом от всходов. Обработка данных исследований позволила получить кривые и уравнения, отражающие эти связи (рисунок 6).

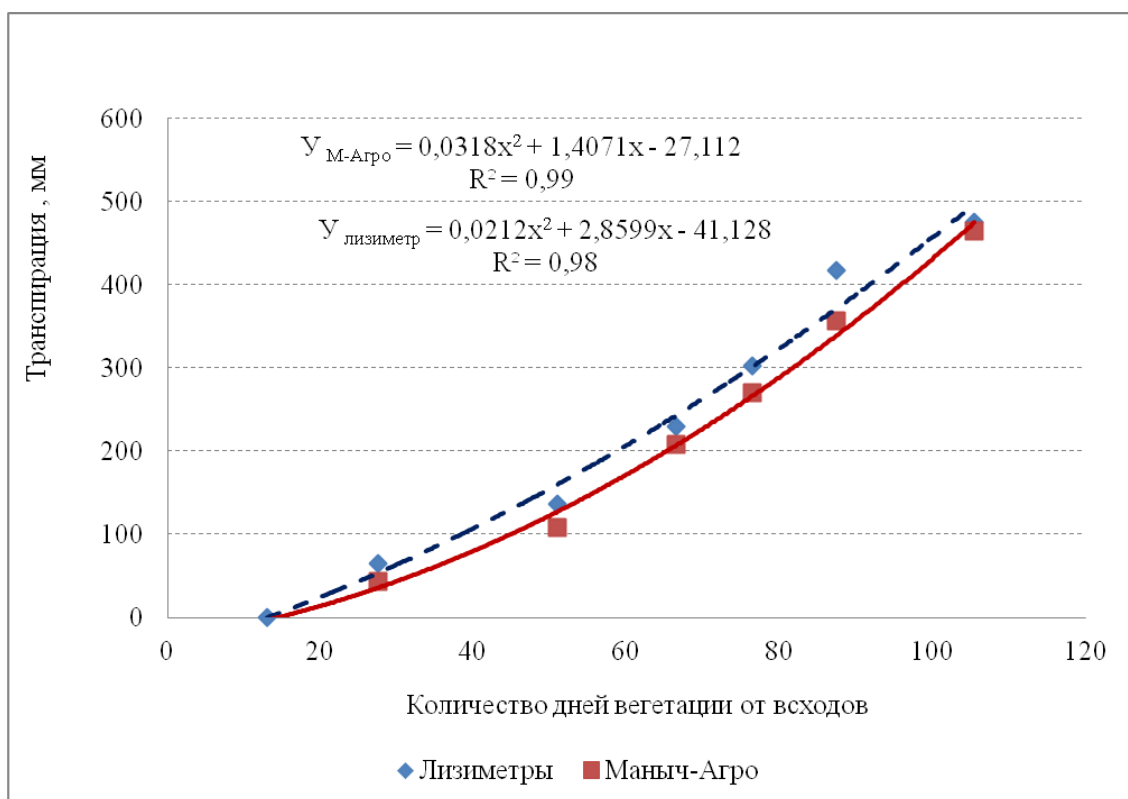


Рисунок 5 – Динамика нарастания суммарной транспирации растений риса от всходов до созревания по данным наблюдений в лизиметрах и в полевых условиях, ООО «Маньч-Агро», сорт Флагман, 2018 г.

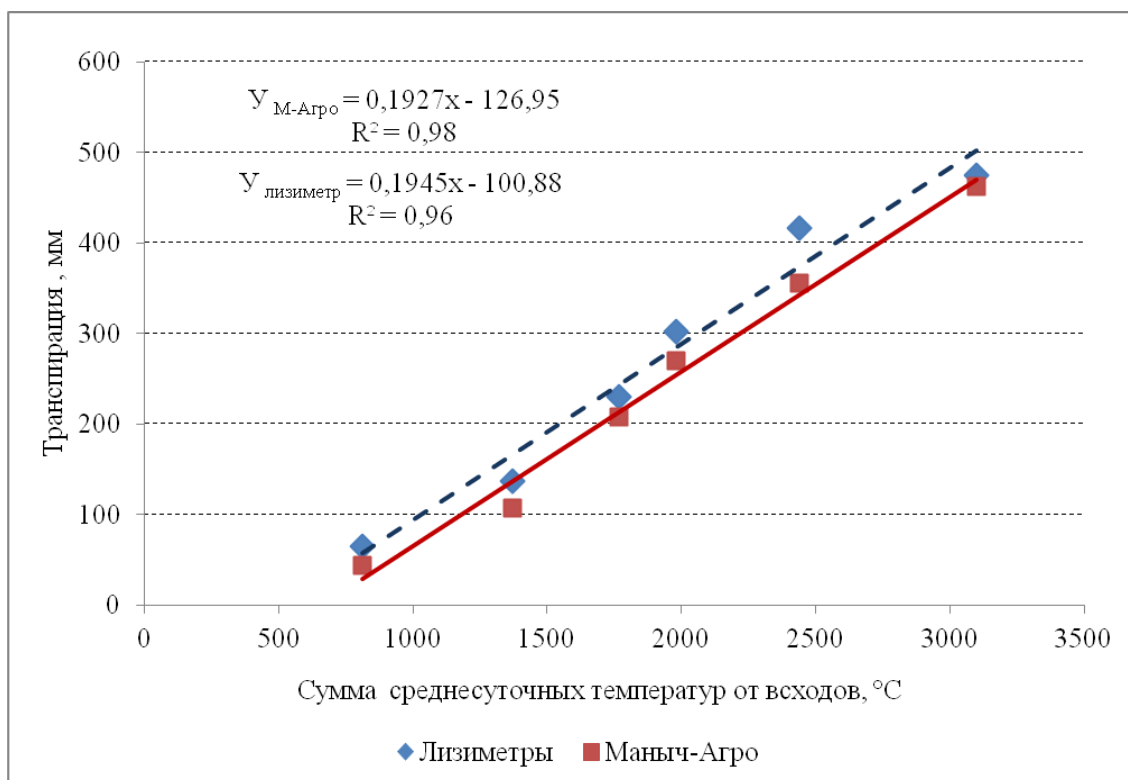


Рисунок 6 – Динамика суммарной транспирации риса в зависимости от суммы температур нарастающим итогом от всходов, 2018 г.

Из данных рисунка 6 видно, что кривые, полученные в результате обработки данных исследований в производственных условиях в ООО «Маньч-Агро» и в лизиметрах на опытном полигоне ФГБНУ «РосНИИПМ», имеют высокие показатели аппроксимации с коэффициентом $R^2 = 0,97...0,99$, это говорит об их тесной взаимосвязи.

При разработке программы для ЭВМ необходимо получение биоклиматических коэффициентов водопотребления риса. В практике большое распространение получили два метода. Это метод А. М. и С. М. Алпатьевых, основанный на использовании упрощенной формулы Н. Н. Иванова, мм: $ET_0 = k_{пр} \cdot d_{\phi}$ (где $k_{пр}$ – коэффициент пропорциональности, равный 0,61), и метод Г. К. Льгова, который основан на использовании биоклиматического коэффициента $k_{б.к.}$, полученного по результатам полевых исследований в конкретных агроклиматических условиях во взаимосвязи с суммой среднесуточных температур нарастающим итогом от всходов $\sum T_{б.к.}$ (рисунок 7).

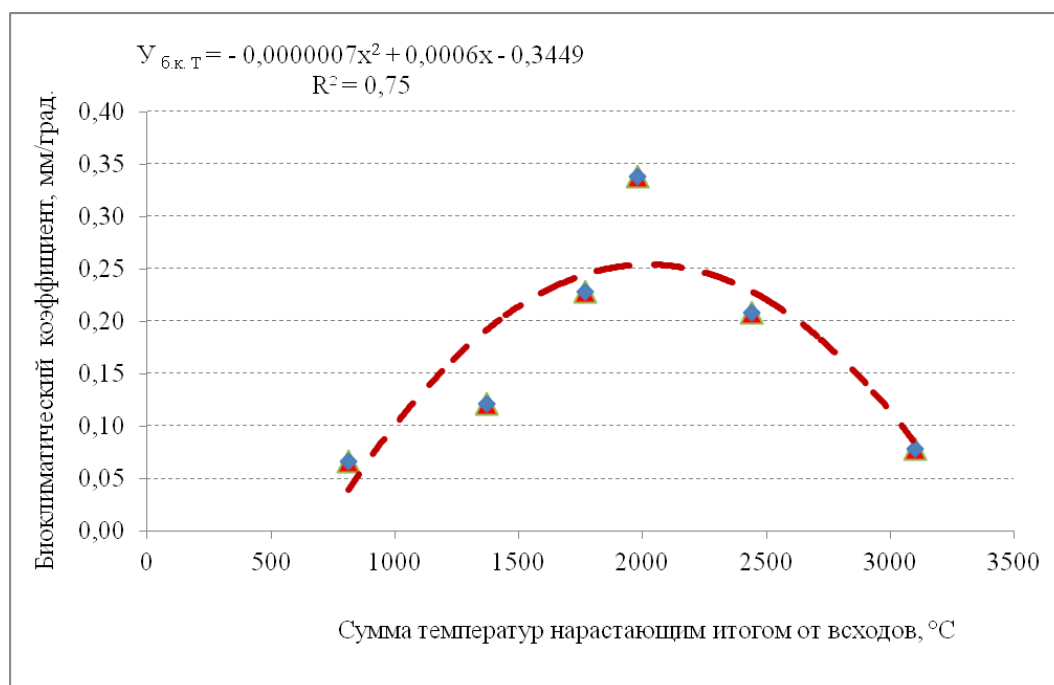


Рисунок 7 – Биоклиматические коэффициенты транспирации риса во взаимосвязи с суммой температур нарастающим итогом от всходов, полученные при исследованиях в лизиметрах на опытном участке научного полигона РосНИИПМ, 2018 г.

Суммарное испарение определяется по формуле, мм:

$$ET_0 = k_{б.к.T} \cdot \sum T_{б.к.},$$

где $k_{б.к.T}$ – биоклиматический коэффициент транспирации, мм/сут;

$T_{б.к.}$ – сумма среднесуточных температур нарастающим итогом от всходов, °С.

Биоклиматический коэффициент транспирации $k_{б.к.T}$, мм/град, для риса во взаимосвязи с суммой температур нарастающим итогом от всходов определяется по уравнению, мм/град:

$$k_{б.к.T} = -0,0000007T_{б.к.}^2 + 0,0006T_{б.к.} - 0,3449.$$

Метод Г. К. Льгова является более практичным, так как достаточно знать сумму среднесуточных температур нарастающим итогом для расчета эвапотранспирации и корректировки оросительных норм в процессе вегетации риса.

Наблюдения за изменением соотношения доли транспирации и испарения с водной поверхности чека по периодам роста показали, что с появлением всходов и покрытием водной поверхности растениями риса испарение с водной поверхности начинает снижаться с 4,4 до 1,5 мм/сут при созревании, а транспирация по периодам роста постепенно возрастает от 2,3 мм/сут в фазе кущения до 13,3 мм/сут в фазе цветения, а затем снижается до 2,7 мм/сут (рисунок 8).

При расчете эвапотранспирации риса нами получено уравнение, позволяющее внести поправки на испаряемость с открытой водной поверхности с учетом влияния проективного покрытия надземными частями растений риса водной поверхности чека (рисунок 9).

Поправочный коэффициент на испарение с водной поверхности чека, занятого рисом, во взаимосвязи с суммой температур от всходов выражается уравнением $k_{\text{ч}} = -0,00000004T^2 - 0,00008T + 0,9959$ с высоким коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,95$.

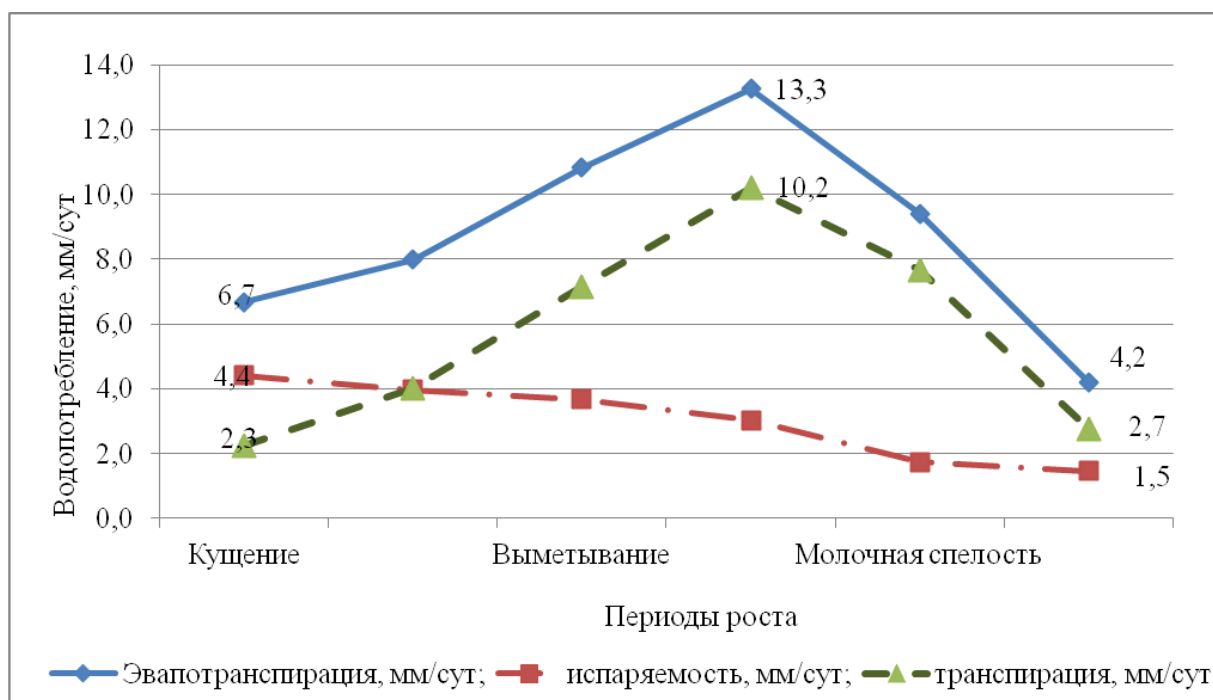


Рисунок 8 – Составляющие эвапотранспирации риса по периодам роста, лизиметры, 2018 г.

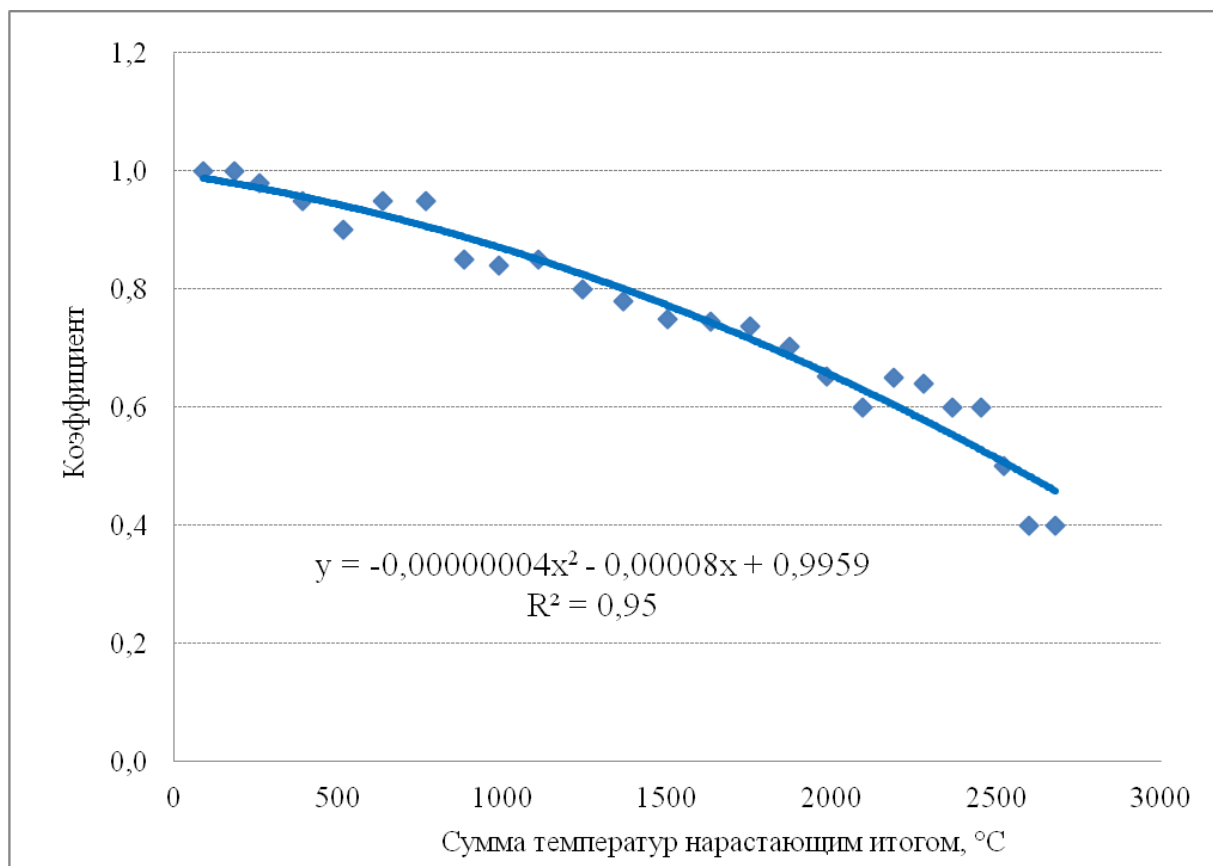


Рисунок 9 – Поправочные коэффициенты, уточняющие испарение с открытой водной поверхности и с водной поверхности чека, занятого посевами риса (данные получены в лизиметрах на опытном участке научного полигона РосНИИПМ, 2018 г.)

На основании алгоритма была разработана программа для ЭВМ «Расчет эвапотранспирации риса в рисовых оросительных системах» [31].

Выводы

1 Проведенные полевые исследования позволили выявить динамику среднесуточной транспирации риса от всходов до созревания в зависимости от суммы среднесуточных температур, определить биоклиматический коэффициент транспирации риса в связи с суммой температур нарастающим итогом от всходов, установить поправочный коэффициент на испарение с водной поверхности чека, занятого рисом.

2 Представленные выше данные позволили разработать алгоритм и программу для ЭВМ для расчета эвапотранспирации риса в рисовых оросительных системах, включающие расчет испаряемости с водной поверхности рисового чека и транспирации риса с использованием информационной базы данных метеопараметров.

3 Программа для ЭВМ позволит автоматизировать процессы расчета эвапотранспирации риса, в т. ч. испарения с водной поверхности рисового чека и транспирации риса, и корректировать объемы водоподачи на рисовые оросительные системы.

Список использованных источников

1 Алпатьев, А. М. Влагообороты в природе и их преобразования / А. М. Алпатьев. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 323 с.

2 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.

3 Харченко, С. И. Гидрология орошаемых земель / С. И. Харченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 75 с.

4 Льгов, Г. К. Орошаемое земледелие / Г. К. Льгов. – М.: Колос, 1979. – 191 с.

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

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

7 Водопотребление и качество воды при орошении сельскохозяйственных культур / А. Ю. Черемисинов, С. П. Бурлакин, И. П. Землянухин, А. А. Черемисинов, С. А. Плотников // Агрэкологический вестник: сборник. – Воронеж: Воронеж. ГАУ, 2012. – С. 53–58.

8 Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: справочник / под. ред. Б. Б. Шумакова. – М.: Колос, 1999. – 432 с.

9 Кван, Р. А. Нормирование водопотребления сельскохозяйственных культур при различных способах орошения / Р. А. Кван // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР. – Минск, 1996. – С. 181–183.

10 Стельмах, Е. А. Аспекты нормирования водопотребности для орошения в условиях Нечерноземной зоны / Е. А. Стельмах // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР. – Минск, 1996. – С. 126–128.

11 Ольгаренко, В. И. К вопросу о модели определения эвапотранспирации с учетом изменчивости гидрометеорологических факторов / В. И. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко, В. Иг. Ольгаренко // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект) [Электронный ресурс]. – 2017. – № 4. – С. 9–14. – Режим доступа: <http://prirodob.vsau.ru/wp-content/uploads/2016/01/№4-Модели-и-технолог.-природообустр..pdf>, 2018.

12 Методические указания по обоснованию проектных режимов орошения сельскохозяйственных культур в ЦЧО / Н. С. Скуратов [и др.]. – Новочеркасск: ЮжНИИГиМ, 1988. – 46 с.

13 Методы изучения и расчета водного баланса / В. С. Вуглинский [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 396 с.

14 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.

15 Turc, L. Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula / L. Turc // Annales agronomiques. – 1961. – № 12. – P. 13–49.

16 Ильинская, И. Н. Нормирование водопотребности для орошения сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе / И. Н. Ильинская. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 163 с.

17 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.

18 Иванов, Н. Н. Об определении величин испаряемости / Н. Н. Иванов // Известия ВГО. – 1954. – Т. 86, № 2. – С. 189–196.

19 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.

20 Шаров, И. А. Эксплуатация гидромелиоративных систем / И. А. Шаров. – М.: Сельхозгиз, 1959. – 448 с.

21 Константинов, А. Р. Нормирование орошения: методы, их оценка, пути уточнения / А. Р. Константинов, Э. А. Струнников // Гидротехника и мелиорация. – 1986. – № 1. – С. 19–28.

22 Ильинская, И. Н. Сравнительная оценка методов расчета водопотребления сельскохозяйственных культур в условиях ЦЧО / И. Н. Ильинская // Интенсивные технологии сельскохозяйственных культур на орошаемых землях Северного Кавказа. – Новочеркасск: ЮжНИИГиМ, 1988. – С. 59–67.

23 Середа, М. В. Расчет эвапотранспирации риса с помощью биоклиматических коэффициентов / М. В. Середа, В. М. Игнатъев // OPEN INNOVATION: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс]. – Пенза: Наука и Просвещение, 2017. – С. 147–150. – Режим доступа: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2017/12/МК-252-Часть-1.pdf>.

24 Щедрин, В. Н. Оптимизация состава приборного обеспечения контроля агрометеопараметров как этап разработки технологии прецизионного орошения / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, А. А. Чураев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2016. – № 3(23). – С. 1–18. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=424&id=425>.

25 Программирование технологии возделывания сельскохозяйственных культур на орошаемых землях Северного Кавказа: рекомендации / Н. А. Кан [и др.]. – Ростов н/Д., 1985. – 120 с.

26 Черемисинов, А. А. Обзор расчетных методов определения суммарного испарения орошаемых сельскохозяйственных земель / А. А. Черемисинов, А. Ю. Черемисинов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2016. – № 1(21). – С. 113–133. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec397-field6.pdf.

27 Сенчуков, Г. А. Нормирование водопотребности сельскохозяйственных культур / Г. А. Сенчуков, И. В. Новикова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2013. – № 3(11). – С. 40–53. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec192-field6.pdf.

28 Укрупненные нормы водопотребности для орошения сельскохозяйственных культур Центрального, Приволжского, Уральского, Сибирского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mcs-dm.ru/sites/all/files/normi_vodopotrebnosti.pdf, 2018.

29 Тулякова, З. Ф. Рис на засоленных землях / З. Ф. Тулякова. – М.: Колос, 1978. – 240 с.

30 Балакай, Г. Т. Эвапотранспирация риса на опытных участках, характерных для рисосеяния Ростовской области / Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, Р. Е. Юркова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2018. – № 4(32). – С. 184–200. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=567&id=578>. – DOI: 10.31774/2222-1816-2018-4-184-200.

31 Прогр. для ЭВМ 2018664402. Расчет эвапотранспирации риса в рисовых оросительных системах / Васильев С. М., Балакай Г. Т., Докучаева Л. М., Юркова Р. Е., Гонзалез-Гальего М. Р., Нецепляев Д. А. – № 20186662213; заявл. 02.11.18; опубл. 16.11.18.

References

1 Alpat'ev A.M., 1969. *Vlagooboroty v prirode i ikh preobrazovaniya* [Hydrological Cycles in Nature and Their Transformations]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 323 p. (In Russian).

2 Kostyakov A.N., 1933. *Osnovy melioratsii: ucheb. posobie* [Basics of Land Reclamation: manual]. 3rd ed., rev. and ext. Moscow, Leningrad, State Collective and State Farm Liter. Publ., 887 p. (In Russian).

3 Kharchenko S.I., 1975. *Gidrologiya oroshaemykh zemel'* [Hydrology of Irrigated Lands]. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 75 p. (In Russian).

4 Lgov G.K., 1979. *Oroshaemoe zemledelie* [Irrigated Agriculture]. Moscow, Kolos Publ., 191 p. (In Russian).

5 Tsipris D.B., Evtushenko E.G., 1980. *Raschet vodopotrebleniya po meteoparametram* [Calculation of water consumption by meteoroparameters]. *Gidrotekhnika i melioratsiya* [Hydraulic Engineering and Land Reclamation], no. 9, pp. 40-42. (In Russian).

6 Ostapchik V.P., 1989. *Informatsionno-sovetuyushchaya sistema upravleniya orosheniem* [Information-advising Irrigation Control System]. Kiev, Harvest Publ., 248 p. (In Russian).

7 Cheremisinov A.Yu., Burlakin S.P., Zemlyanukhin I.P., Cheremisinov A.A., Plotnikov S.A., 2012. *Vodopotreblenie i kachestvo vody pri oroshenii sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Water consumption and water quality during agricultural crops irrigation]. *Agroekologicheskii vestnik: sbornik* [Agroecological Bulletin: Proceed.]. Voronezh State Agrarian University Publ., pp. 53-58. (In Russian).

8 Shumakov B.B., 1999. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. Oroshenie: spravochnik*

[Land Reclamation and Water Management. Irrigation: a reference book]. Moscow, Kolos Publ., 432 p. (In Russian).

9 Kwan R.A., 1996. *Normirovanie vodopotrebleniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur pri razlichnykh sposobakh orosheniya* [Rationing of crop water consumption under various irrigation methods]. *Sb. nauch. tr. CNIKIVR* [Proceed. TsNIKIVR]. Minsk, pp. 181-183. (In Russian).

10 Stel'makh E.A., 1996. *Aspekty normirovaniya vodopotrebnosti dlya orosheniya v usloviyakh Nechernozemnoy zony* [Aspects of rationing water demand for irrigation under the conditions of the Nonchernozem Zone]. *Sb. nauch. tr. CNIKIVR* [Proceed. of TsNIKIVR]. Minsk, pp. 126-128. (In Russian).

11 Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.Ig., 2017. *K voprosu o modeli opredeleniya evapotranspiratsii s uchetom izmenchivosti gidrometeorologicheskikh faktorov* [The issue of the model for determining evapotranspiration taking into account the variability of hydrometeorological factors]. *Modeli i tekhnologii prirodoobustroystva (regional'nyy aspekt)* [Models and Technologies of Environmental Engineering (Regional Aspect)], no. 4, pp. 9-14, available: <http://prirodoob.vsau.ru/wp-content/uploads/2016/01/№-4-Модели-и-технолог.-прироdoобустр..pdf>, 2018. (In Russian).

12 Skuratov N.S. [and others], 1988. *Metodicheskie ukazaniya po obosnovaniyu proektnykh rezhimov orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v TSCHO* [Methodological guidelines for justification of the design regimes for agricultural crops irrigation in the Central Precipitation Center]. Novocherkassk, YuzNIIGiM Publ., 46 p. (In Russian).

13 Vuglinsky V.S. [et al.], 1981. *Metody izucheniya i rascheta vodnogo balansa* [Methods of Studying and Calculating Water Balance]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 396 p. (In Russian).

14 Penman H.L., 1948. Natural evaporation from the water. *Proc. R. Soc., London (A)*, vol. 193, pp. 120-145. (In English).

15 Turc L., 1961. Water requirements assessment, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula. *Annales agronomiques*, no. 12, pp. 13-49. (In English).

16 Il'inskaya I.N., 2001. *Normirovanie vodopotrebnosti dlya orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na Severnom Kavkaze* [Rationing of water demand for irrigation of agricultural crops in the North Caucasus]. Novocherkassk, YuRGTU Publ., 163 p. (In Russian).

17 Alpat'ev S.M., 1973. *Metodika rascheta rezhimov orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na osnove bioklimaticheskogo metoda dlya Evropeyskoy chasti SSSR s primeneniem EVM* [Methodology for calculating crop irrigation regimes based on the bioclimatic method for the European part of the USSR using a computer]. Kiev, MIMVH USSR Publ., 9 p. (In Russian).

18 Ivanov N.N., 1954. *Ob opredelenii velichin ispyaemosti* [Determination of Evaporation Values]. *Izvestiya VGO* [Bull. of VGO], vol. 86, no. 2, pp. 189-196. (In Russian).

19 Shtoyko D.A., 1965. *Normativy proektirovaniya rezhimov orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur i gidromodulya v usloviyakh intensivnogo ispol'zovaniya oroshaemykh zemel'* [Standards for design of irrigation regimes of agricultural crops and irrigation module under the intensive use of irrigated land]. *Oroshaemoe zemledelie v YECH SSSR* [Irrigated agriculture in the European Part of the USSR]. Moscow, Kolos Publ., pp. 171-185. (In Russian).

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

21 Konstantinov A.P., Strunnikov E.A., 1986. *Normirovanie orosheniya: metody, ikh otsenka, puti utochneniya* [Irrigation rationing: methods, their assessment, ways of refinement]. *Gidrotekhnika i melioratsiya* [Hydraulic Engineering and Land Reclamation], no. 1, pp. 19-28. (In Russian).

22 Il'inskaya I.N., 1988. *Sravnitel'naya otsenka metodov rascheta vodopotrebleniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v usloviyakh TSCHO* [Comparative assessment of methods for calculating the water consumption of crops in the CEC]. *Intensivnye tekhnologii sel'skokho-*

zyaystvennykh kul'tur na oroshaemykh zemlyakh Severnogo Kavkaza [Intensive Technologies of Crops on Irrigated Lands of the North Caucasus]. Novocherkassk, YuzhNIIGiM Publ., pp. 59-67. (In Russian).

23 Sereda M.V., Ignatiev V.M., 2017. *Raschet evapotranspiratsii risa s pomoshch'yu bioklimaticheskikh koeffitsientov* [Calculation of rice evapotranspiration using bioclimatic coefficients]. *OPEN INNOVATION: Sb. nauch. tr. II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konfrentsii. V 2 ch. Ch. 1* [OPEN INNOVATION: Proceed. II International Scientific-Practical Conference. In 2 parts. Part 1]. Penza, Nauka i prosveshchenie Publ., pp. 147-150, available: https://elibrary.ru/download/elibrary_31199469_20223824.pdf. (In Russian).

24 Shchedrin V.N., Vasilyev S.M., Churaev A.A., 2016. *Optimizatsiya sostava pribornogo obespecheniya kontrolya agro-meteoroparametrov kak etap razrabotki tekhnologii pretsizionnogo orosheniya* [Optimization of instrumentation structure for the of agro-meteorological parameters control as a stage of precision irrigation process development]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 3(23), pp. 1-18, available: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=424&id=425>. (In Russian).

25 Kan N.A. [et al.], 1985. *Programmirovaniye tekhnologii vozdeleyvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na oroshaemykh zemlyakh Severnogo Kavkaza: rekomendatsii* [Programming the technology of agricultural crops cultivation on the irrigated lands of the North Caucasus: recommendations]. Rostov n/Don, 120 p. (In Russian).

26 Cheremisinov A.A., Cheremisinov A.Yu., 2016. *Obzor raschetnykh metodov opredeleniya summarnogo ispareniiya oroshaemykh sel'skokhozyaystvennykh zemel'* [Review of computational methods for determining the total use of irrigated agricultural lands]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 1(21), pp. 113-133, available: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec397-field6.pdf. (In Russian).

27 Senchukov G.A., Novikova I.V., 2013. *Normirovaniye vodopotrebnosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Rationing of water requirements of agricultural crops]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 3(11), pp. 40-53, available: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec192-field6.pdf. (In Russian).

28 *Ukrupnennyye normy vodopotrebnosti dlya orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur Tsentral'nogo, Privolzhskogo, Ural'skogo, Sibirskogo, Yuzhnogo i Severo-Kavkazskogo federal'nykh okrugov* [Enlarged water requirements for irrigation of agricultural crops of the Central, Volga, Ural, Siberian, Southern and North Caucasus Federal Districts], available: http://mcx-dm.ru/sites/all/files/normi_vodopotrebnosti.pdf, 2018. (In Russian).

29 Tulyakova Z.F., 1978. *Ris na zasolennykh zemlyakh* [Rice on Saline Lands]. Moscow, Kolos Publ., 240 p. (In Russian).

30 Balakai G.T., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E., 2018. *Evapotranspiratsiya risa na opytnykh uchastkakh, kharakternykh dlya risoseyaniya Rostovskoy oblasti* [Evapotranspiration of rice in experimental plots typical for rice growing in Rostov region]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 4(32), pp. 184-200, available: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=567&id=578>. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-4-184-200. (In Russian).

31 Vasil'ev S.M., Balakai G.T., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E., Gonzalez-Gal'ego R.R., Netseplyaev D.A., 2018. *Raschet evapotranspiratsii risa v risovykh orositel'nykh sistemakh* [Calculation of rice evapotranspiration in rice irrigation systems], *Prog. for computer*, no. 2018664402. (In Russian).

Балакай Георгий Трифионович

Ученая степень: доктор сельскохозяйственных наук

Ученое звание: профессор

Должность: главный научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Balakaу Georgy Trifonovich

Degree: Doctor of Agricultural Sciences

Title: Professor

Position: Chief Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Юркова Рита Евгеньевна

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Yurkova Rita Yevgenyevna

Degree: Candidate of Agricultural Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Докучаева Лидия Михайловна

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Dokuchayeva Lidiya Mikhaylovna

Degree: Candidate of Agricultural Sciences

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Ольгаренко Владимир Игоревич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: olgarenko_vi@mail.ru

Olgarenko Vladimir Igorevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: olgarenko_vi@mail.ru

Пономаренко Таисия Сергеевна

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipmovpvapk@yandex.ru

Ponomarenko Taisia Sergeevna

Position: Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipmovpvapk@yandex.ru