

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ РАСЧЕТОМ ПОЛИВА ПОСЕВОВ НА ОРОШАЕМОМ ПОЛЕ

Л.В. Козырева, А.В. Доброхотов

E-mail: 4ludak@gmail.com

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ: Определение влагообеспеченности посевов и норм полива является важнейшей задачей при выращивании сельскохозяйственных культур в засушливых регионах. Целью данного исследования является разработка автоматизированной информационной технологии для принятия решений при орошении. За основные показатели влагообеспеченности орошаемого поля в работе приняты эталонное, потенциальное и реальное суммарные испарения, индекс водного стресса. Показатели влагообеспеченности определяются по данным мониторинга агрометеорологических, физиологических параметров посевов.

Для проведения мониторинга в Агрофизическом научно-исследовательском институте создан автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК). Программное обеспечение комплекса позволяет в режиме реального времени сохранять синхронно измеренные временные ряды данных, по которым производится автоматизированный расчет эталонного, потенциального и реального испарения, индекса водного стресса и норм полива. В результате проведения полевых экспериментов апробированы методы оценки суммарного испарения, водного стресса растений. Автоматизированная информационная технология, включающая проведение мониторинга, создание базы данных, расчетных алгоритмов по моделям энергомассообмена в системе «почва – растение – приземный слой воздуха», может служить основой для экспертной системы принятия решений при орошении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированная информационная технология, орошение, показатели влагообеспеченности посевов, суммарное испарение, автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК).

Орошение – один из важнейших факторов повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Определение оптимального водного режима почв и соответствующих норм и сроков полива посевов в вегетационный период с применением информационных технологий является актуальным для сель-

ского хозяйства. Максимальный эффект от орошения в значительной степени зависит от выбора норм и сроков полива, которые могут определяться различными методами. Информационные системы и методы планирования орошения разработаны в России и за рубежом. Так, Г.В. Ольгаренко, Т.А. Капустиной и др. [1, 2] в качестве комплексного показателя, характеризующего агроклиматические условия, принят коэффициент природного увлажнения, который косвенно учитывает связь энергетического и водного балансов на растительной поверхности сельскохозяйственных культур без суммарного испарения. В других отечественных методиках используется суммарное испарение, которое рассчитывается в зависимости от дефицита влажности в приземном слое воздуха по среднесуточной температуре воздуха и биофизическим коэффициентам [3]. Для повышения точности расчета водопотребления по биоклиматическому методу В.П. Остапчик [4] предложил вместо данных о дефиците влажности вводить данные о суточном испарении с водной поверхности. К недостаткам определения режима орошения посевов биоклиматическими методами относятся их четко выраженная локальность, отсутствие учета биологических и сортовых особенностей растений. Также широко распространено определение влагообеспеченности растений через уравнение водным балансом [5]. Однако определение продуктивной влаги в почве трудоемко и нерепрезентативно, т. к. точечные данные не всегда могут охарактеризовать пространственную неоднородность сельскохозяйственного поля. Показатель влагообеспеченности сельскохозяйственных посевов должен быть реализован доступными и современными техническими средствами с возможностью автоматизации расчетов и дальнейшего применения в совокупности с данными дистанционного зондирования Земли для определения пространственной неоднородности влагообеспеченности посевов.

Информационная технология – основа современных информационных систем любого назначения. В рамках проведенного исследования поставлена задача разработать структуру информационной технологии для автоматизации управления нормами и сроками полива посевов сельскохозяйственных культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разработанной технологии автоматизированного управления водным режимом посевов реализуются следующие информационные процессы: сбор (мониторинг), хранение (базы данных), передача и обработка информации (методы, модели, алгоритмы). Предлагаемая информационная технология может быть использована для управления водным режимом в масштабе поля с конкретной культурой. В создании структуры технологии заложены законы сохранения энергии и массы на растительной поверхности. Математические модели, основанные на этих фундаментальных законах, описывают расчет

величины суммарного испарения в процессах энерго- и массообмена в системе «почва–растение–приземный слой воздуха» с использованием энергетического баланса растительной поверхности. В предложенной структуре информационной технологии типы суммарного испарения являются основными величинами, с использованием которых возможно отследить потребность растений в воде за весь вегетационный период с временным шагом сутки.

Мониторинг сбора информации

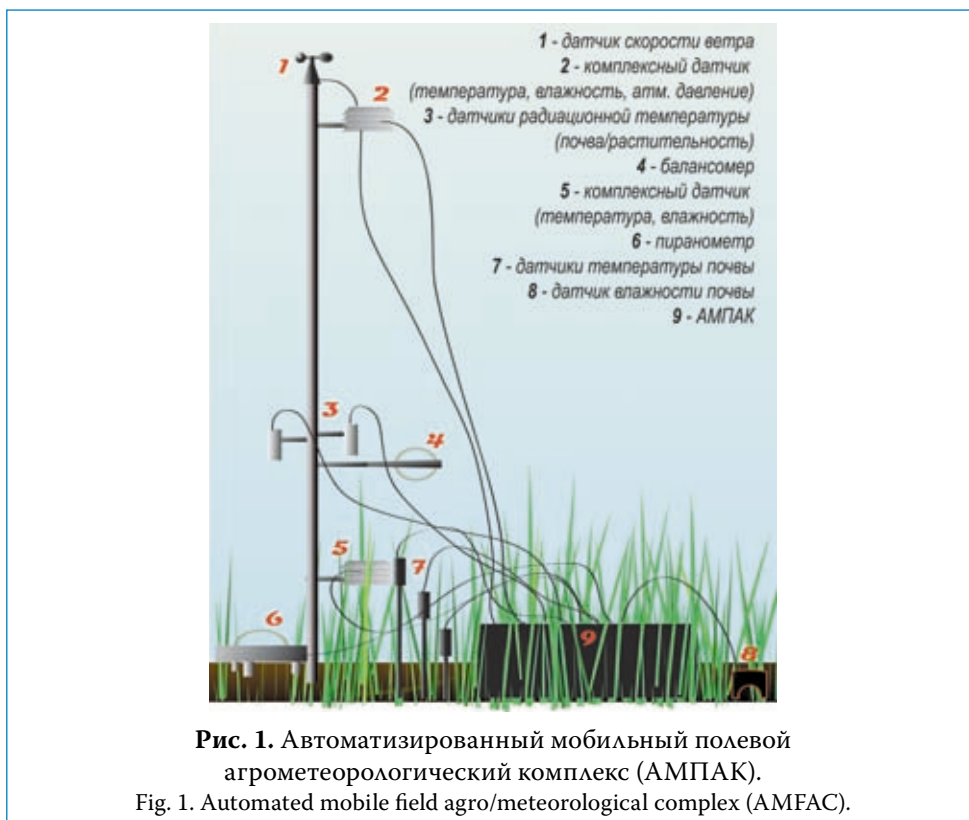
Для сбора метеорологической и фенологической информации с полей конкретных культур в Агрофизическом институте создан автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК) и специальное программное обеспечение комплекса [6–10]. Орошение меняет микроклимат сельскохозяйственного поля и поэтому АМПАК необходимо размещать на каждом поле с конкретной культурой, водопотребление которой связано с ее биологическими особенностями. Возможна автоматизация управления режимом орошения нескольких полей с одного компьютерного центра.

АМПАК осуществляет обработку метеоданных однородного сельскохозяйственного поля, рассчитывает в режиме реального времени суммарное испарение и определяет нормы и сроки поливов [6, 11]. Комплекс оснащен оригинальным программным обеспечением, позволяющим осуществлять дистанционное беспроводное управление (рис.1).

В процессе проведения полевых экспериментов измеряли следующие физические величины: аэродинамическая температура (датчик HEL-705-U-1-12-C2, HoneywellInternational, Inc.) и влажность воздуха (датчик H1H-4602-C, HoneywellInternational, Inc) на двух высотах, атмосферное давление (MPX4115AP, HoneywellInternational, Inc.), скорость ветра на высоте 2 м (датчик Windgeschwindigkeitssensor, HIM), радиометрическая температура над растительностью и над почвой (датчик OpttrisGmbH, СТ LT), радиационный баланс поверхности (балансомер, АФИ), суммарная радиация (пиранометр Янишевского), объемная влажность почвы на глубине 10 см (датчик DecagonDevices 10HS) и температура почвы на разных глубинах. Данные фиксировали синхронно с интервалом в 90 с.

АМПАК реализует расчет суммарного испарения на основе уравнения энергетического баланса с учетом аэродинамических характеристик подстилающей поверхности. Входными данными являются метеорологические параметры, собираемые АМПАК в автоматическом режиме, а также параметры растительного покрова, которые вносятся пользователем в компьютер с помощью клиентского приложения. Клиентское приложение содержит таблицы экспериментальных метеорологических данных, параметров эксперимента, коэффициентов развития культур, которые собираются в специальной базе данных эксперимента.

Выходной информацией комплекса являются эталонная, потенциальная и реальная эвапотранспирация, а также норма полива и индекс водного стресса, являющийся индикатором полива. Входные и выходные параметры накапливаются в базе данных с шагом в 20 мин за весь вегетационный период. Сохраняются и данные промежуточных расчетов: парциальное давление водяного пара, число Ричардсона, аэродинамическое сопротивление, скрытый (затраты тепла на испарение) и явный (турбулентный) поток тепла. Данная методика реализуется на автоматизированном комплексе в режиме реального времени [7, 8, 13].



Методика для принятия решения о нормах и сроках полива

В Агрофизическом институте на основе методики ФАО-56 [14–16], уравнения Пенмана–Монтейса и уравнения энергетического баланса создана методика для принятия решения о нормах и сроках полива [18]. Методика включает расчеты эталонного, потенциального и реального суммарных испарений с конкретных посевов. Эталонное суммарное испарение (ET_0) определяется по формуле [14]:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{0,925}{T+273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u)}, \quad (1)$$

где Δ – наклон кривой, выражающей отношение давления насыщенного водяного пара к температуре воздуха;

кПа°/С; R_n – радиационный баланс подстилающей поверхности, МДж/м²ч;

G – поток тепла в почву, МДж/м²ч;

γ – психрометрическая постоянная, кПа/°С;

T – температура воздуха, °С;

u – скорость на высоте z , м/с;

e_a – парциальное давление водяного пара, кПа;

e_s – давление насыщенного водяного пара, кПа.

Потенциальное суммарное испарение (ET_p) – максимально возможное суммарное испарение с поверхности конкретного посева [14, 16]:

$$ET_p = ET_0 k_c, \quad (2)$$

где k_c – безразмерный коэффициент культуры.

Реальное суммарное испарение (ET_r) рассчитывается как остаточный член уравнения энергетического баланса [18,19]:

$$ET_r = R_n - H - G. \quad (3)$$

Нормой полива ($ПН$, м³/га) считается количество воды, необходимое растению для оптимального развития. Поливную норму чаще всего считают постоянной для какой-либо культуры, учитывая только климатические факторы и отбрасывая погодные, хотя погодные факторы могут играть ключевую роль при определении использования воды растениями. Поливная норма в проведенных исследованиях определялась за сутки с учетом погодных факторов по разнице между потенциальным (ET_p) и реальным суммарным испарениями (ET_r) [18] с конкретного посева:

$$ПН = 10 \cdot (ET_p - ET_r). \quad (4)$$

Индекс водного стресса $CWSI$ (CropWaterStressIndex) [20–23], основанный на измерении дневного хода температуры растительного покрова, используется для диагностики состояния посевов. Рост температуры листа является хорошим показателем критического содержания влаги в растении. Критическое содержание влаги наступает, когда потребность в воде для растения больше, чем ее доступность. Индекс водного стресса служит индикатором полива и является альтернативной заменой расчета длительности межполивного периода. Отношение реального испарения к потенциальному можно использовать как индекс водного стресса $CWSI$ [24, 23]:

$$CWSI = 1 - ET_r / ET_p. \quad (5)$$

Время полива определяется предельным значением индекса водного стресса, причем каждая культура имеет свой предел в диапазоне от 0,3 до 0,6, который также зависит от величины суммарного испарения. Эффективное распределение воды при орошении в течение вегетационного периода возможно при точных расчетах водопотребления культуры и метеорологических данных, полученных непосредственно на сельскохозяйственном поле.

Базы данных

Все измеренные агрометеорологические параметры и типы суммарных испарений отображаются в виде численных значений, графиков и накапливаются в базу данных АМПАК за временной период измерения. Для примера на рис. 2 представлены данные проведенного полевого испытания в Волгоградской области на орошаемом поле люцерны.

Для базы данных создан специальный пользовательский интерфейс, позволяющий проводить апробацию различных моделей по данным АМПАК. К базе данных также разработан специальный пользовательский интерфейс для создания дополнительных расчетных модулей. Интерфейс написан на языке программирования Python, позволяющем использовать доступные библиотеки для данного языка. Созданная автоматизированная система расчета может быть модифицирована под различные задачи с использованием дополнительных или альтернативных алгоритмов расчета.

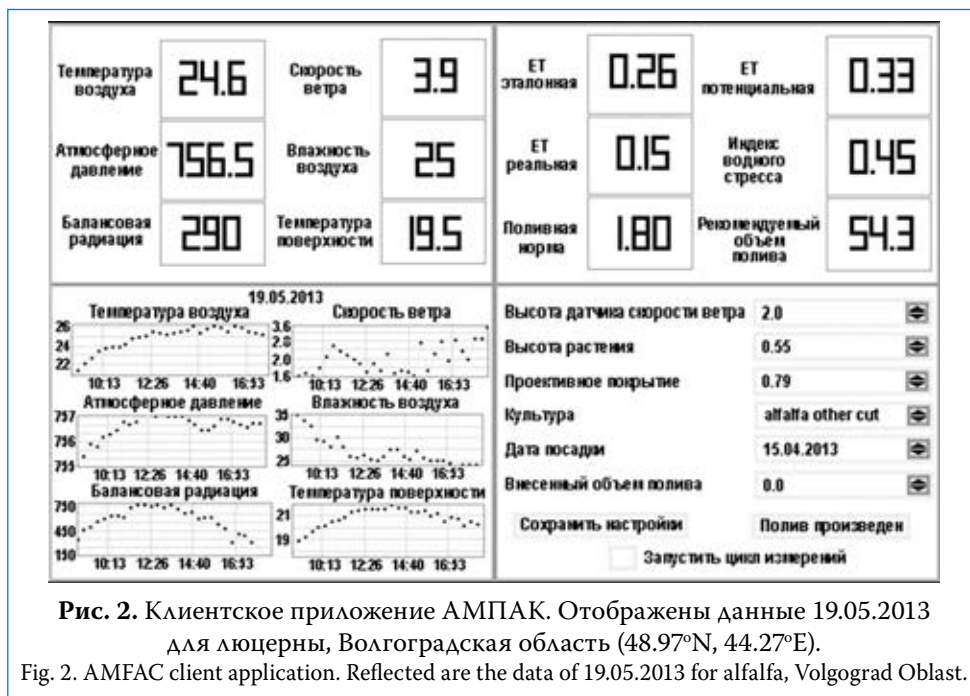


Рис. 2. Клиентское приложение АМПАК. Отображены данные 19.05.2013 для люцерны, Волгоградская область (48.97°N, 44.27°E).

Fig. 2. AMFAC client application. Reflected are the data of 19.05.2013 for alfalfa, Volgograd Oblast.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В пос. Водный на опытном поле люцерны ВНИИОЗ в период с 16 по 23 мая 2013 г. проведен полевой эксперимент определения водопотребления люцерны по данным АМПАК. Вода, внесенная 17 мая в размере 200 м³/га (20 мм), неравномерно расходовалась на суммарное испарение за 4 дня. Неравномерное распределение расхода поливной воды можно объяснить изменчивостью погодных условий за данный промежуток времени, что демонстрирует зависимость реального суммарного испарения от погодного фактора (ET_0). Разница между этими величинами будет тем больше, чем меньше доступной растениям влаги в почве. За исследуемый межполивной период разница эталонного и реального суммарного испарения составила от 1,2 до 4,8 мм, при пересчете в поливную норму – 105 м³/га. На рис. 3 можно проследить «оазисный» эффект, который создается на орошаемых полях. Орошение понижает температуру подстилающей поверхности, тем самым создавая приземную инверсию при положительном радиационном балансе. В этом случае явный поток тепла меняет направление, увеличивая суммарное испарение.

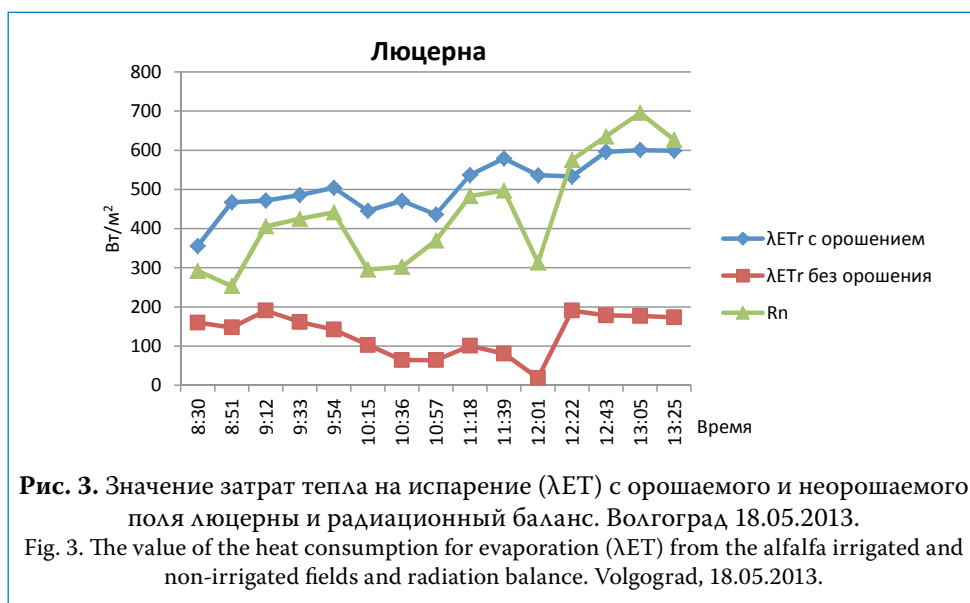


Рис. 3. Значение затрат тепла на испарение (λET) с орошаемого и неорошаемого поля люцерны и радиационный баланс. Волгоград 18.05.2013.

Fig. 3. The value of the heat consumption for evaporation (λET) from the alfalfa irrigated and non-irrigated fields and radiation balance. Volgograd, 18.05.2013.

Полученные экспериментальные данные позволили также провести сравнительный анализ расчета поливной нормы для посевов люцерны по созданной методике [10] с использованием метеопараметров, измеренных непосредственно на поле и метеостанции Гумрак, находящейся в 27 км от экспериментального поля. Данные для исследуемой территории являются

репрезентативными согласно наставлению по Глобальной системе наблюдений ВМО. За отрезок времени (8:00–14:00) осредненные величины температуры воздуха на сельскохозяйственном поле были выше, чем на метеостанции на 2,3 °С, относительной влажности на 3 % выше, скорости ветра на 1,7 м/с ниже.

Для приближенной оценки реальной эвапотранспирации по данным метеостанции Гумрак (табл. 1) использована температура поверхности и радиационный баланс неорошаемого поля. Температура подстилающей поверхности и радиационный баланс орошаемого поля значительно отличаются от данных, измеренных на метеостанции (или неорошаемом поле). Для примера, средняя дневная температура подстилающей поверхности, измеренная на неорошаемом и орошаемом участках поля люцерны отличалась 18 мая 2013 г. на 8,5 °С.

Поливная норма, рассчитанная с 18 по 20 мая по данным метеостанции Гумрак, равна 224 м³/га, а по данным АМПАК – 101 м³/га. Радиационная температура поверхности для разных полей значительно отличается, поэтому использование данных метеорологической станции без учета температуры поверхности приведет к значительным ошибкам в определении норм орошения и индекса водного стресса.

Таблица 1. Расчетные величины эталонной (ET_0), потенциальной (ET_p), реальной (ET_r) эвапотранспирации и поливной нормы (ПН) для поля люцерны по данным метеостанции Гумрак и данным АМПАК в пос. Водный
 Table 1. Calculated values of the reference (ET_0), potential (ET_p), and actual evapotranspiration and irrigation norm (ПН) for an alfalfa field according to Gumrak meteorological station and AMFAC data for the settlement of Vodniy

	18.05.2013		19.05.2013		20.05.2013	
	Гумрак	Водный	Гумрак	Водный	Гумрак	Водный
ET_0 , мм	9,5	9,0	8,3	7,2	6,3	6,0
ET_p , мм	11,9	11,2	10,3	8,9	7,8	7,5
ET_r , мм	3,1	6,8	2,8	5,7	1,8	4,9
ПН, м ³ /га	88,2	43,7	75,5	32,2	60,2	25,4

Таким образом, определение поливной нормы по параметрам микроклимата орошаемого сельскохозяйственного поля с помощью АМПАК может существенно сэкономить расход воды при орошении.

Оценка эффективности оросительных приемов

Максимальный урожай формируется лишь при максимально возможном водопотреблении для данных метеорологических условий. Первым признаком водного голодания является снижение транспирации. Интенсивная транспирация обусловлена большим открытием устьиц и вызывает активное поглощение воды и минеральных веществ из почвы. Следовательно, можно сделать вывод, что при прочих оптимальных условиях развития растений, максимальный урожай достигается путем оптимального и своевременного полива. Влияние водного стресса на урожай [18] оценивается по формуле:

$$k_s = 1 - \frac{1}{k_y} \left(1 - \frac{Y_a}{Y_{max}} \right), \quad (6)$$

где Y_a – фактический урожай;

Y_{max} – максимально возможный урожай данной культуры в данном регионе;

k_y – коэффициент водопотребления культуры;

k_s – коэффициент водного стресса.

С учетом погодных условий по коэффициенту водного стресса можно вычислить реальное суммарное испарение за вегетационный период (ΣET_r) с поля и определить количество воды (ΔOH), необходимое в течение вегетационного периода для получения максимального урожая [18].

$$\begin{aligned} \Sigma ET_r &= k_s \cdot \Sigma ET_p, \\ \Delta OH &= \Sigma ET_p - \Sigma ET_r, \end{aligned} \quad (7)$$

где ΣET_r – фактическое суммарное испарение за вегетационный период;

ΣET_p – максимальное (потенциальное) суммарное испарение с конкретной культуры.

Развитие посевов второго укоса люцерны характеризуется более высокими температурами воздуха (наблюдалось в два раза больше дней со средней суточной температурой выше 30 °С), низкой относительной влажностью (в 1,5 раза больше дней с атмосферной засухой, т. е. влажностью менее 30 %) и малым количеством осадков (в три раза меньше). Такие погодные условия увеличивают суммарное потенциальное испарение (ΣET_p) и уменьшают фактическое суммарное испарение (ΣET_r), т. е. имеется большой потенциал тепла для испарения, однако недостаток влаги в почве в реальных условиях лимитирует фактическое испарение, что показывает расчет по данным метеостанции Гумрак (табл. 2). Например, при недостатке полива в 611 м³/га за вегетационный период потери урожая первого укоса люцерны составляют 21 %.

Таблица 2. Результаты расчетов водопотребления люцерны, 2012 г.
Table 2. The alfalfa water consumption calculation results, 2012

Люцерна	ΣET_p (мм)	Y_a (т/га)	Y_{max} (т/га)	k_y	k_s	ΣET_r (мм)	ΔOH (мм)
1 укос	326,4	13,5	17	1,1	0,8	265,3	61,1

Различные посевы с их фенологическими особенностями и режимами орошения по-разному влияют на метеопараметры – температуру подстилающей поверхности, скорость ветра и радиационный баланс орошаемого поля. Поэтому мониторинг метеорологических параметров следует производить на каждом поле с конкретным посевом для оптимизации поливных норм и сроков полива. Обычно в этих целях на полях размещают автоматические метеостанции и по полученным данным рассчитывают нормы режима орошения.

ВЫВОДЫ

Рациональное использование воды в течение вегетационного периода возможно при точных расчетах водопотребления культуры с использованием метеорологических данных, полученных непосредственно на сельскохозяйственном поле. Методика определения биологического водопотребления посевов в вегетационный период с суточным временным шагом дает возможность определять три типа суммарного испарения в режиме реального времени, нормы и сроки поливов.

Мониторинг показателей теплового баланса в системе «почва–растение–приземный слой воздуха» на основе сочетания дистанционных систем зондирования (космических снимков) и наземного измерительно-вычислительного комплекса АМПАК позволяет точно учесть микроклиматические факторы тепло-и влагообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур при проектировании и построении адаптивно-ландшафтных систем земледелия нового поколения, а также при разработке элементов технологии точного земледелия, нуждающихся в учете микроклиматических факторов.

Созданная база данных позволит проводить валидацию и верификацию моделей энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле для эффективного использования данных дистанционного зондирования Земли. В настоящее время космические методы зондирования земной поверхности достигли высокого уровня по качеству снимков в различных спектральных диапазонах, а также по степени покрытия территорий и временному шагу. В перспективе созданную информационную технологию возможно использовать с единовременными наземными измерениями АМПАК и спутниковым зондированием для построения электронных тематических карт составляющих энергетического баланса и суммарного испарения с различными временны-

ми масштабами. Автоматизированная информационная технология обеспечивает эффективное расходование поливной воды в оросительных системах, а также мониторинг за ростом и развитием сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ольгаренко Г.В., Цекоева Ф.К.* Планирование экологически безопасных режимов орошения агробиоценозов с учетом изменчивости гидрометеорологических условий // *Природообустройство*. 2012. № 5. С. 7–11
2. Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения. М.: Росинформагротех, 2015. 264 с.
3. *Давитая Ф.Ф., Мельник Ю.С.* Проблема прогноза испаряемости и оросительных норм. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 72 с.
4. *Остапчик В.П.* Планирование режимов орошения на основе биоклиматического метода расчета водопотребления сельскохозяйственных культур. ЦБНТИ Минводхоза СССР. М., 1981. 90 с.
5. *Муромцев Н.А., Коваленко П.И., Семенов Н.А., Мажайский Ю.А., Язык Н.В., Шуравилин А.В., Воронай Г.В., Анисимов К.Б., Коломиец С.С.* Внутрипочвенный влагообмен, водопотребление и водообеспеченность многолетних культурных травостоев. Рязань, 2013. 300 с.
6. *Ефимов А.Е., Козырева Л.В.* Мобильный агрометеорологический информационно – измерительный комплекс: сб. Междунар. научно-практ. конф. «АГРОИНФО-2009». Сибирский физико-технический институт аграрных проблем СО Россельхозакадемии. Новосибирск, 2009. С. 276–277.
7. *Ефимов А.Е., Козырева Л.В.* Программа для обработки экспериментальных полевых данных и вычисления агрометеорологических параметров фитоклимата сельскохозяйственного поля; св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ, № 2010616625, 5.10.2010.
8. *Ефимов А.Е., Козырева Л.В.* Компьютерная программа для мониторинга эталонной эвапотранспирации поверхности и потенциальной эвапотранспирации сельскохозяйственного поля с различными временными интервалами (суточными, часовыми дневными и ночными): св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ, № 2012610424, 10.01.2012.
9. *Ефимов А.Е., Ситдикова Ю.Р., Козырева Л.В., Доброхотов А.В.* АМПАК (Автоматизированный Мобильный Полевой Агрометеорологический Комплекс): методические указания по использованию. ФГБНУ АФИ. Санкт-Петербург, 2013.
10. *Ефимов А.Е., Ситдикова Ю.Р., Доброхотов А.В., Козырева Л.В.* Мониторинг эвапотранспирации на сельскохозяйственном поле, определение норм и сроков полива автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. № 1. С. 100–105. DOI: 10.7868/S032105961801008X.
11. *Максенкова И.А., Доброхотов А.В., Козырева Л.В.* Параметрическая идентификация модели роста и развития AQUACROP на посевах рапса в Ленинградской области // *Агрофизика*. 2018. № 1. С. 44–53.

12. Козырева Л.В., Доброхотов А.В., Ефимов А.Е. Максенкова И.Л., Бартнев Д.Л. Информационная база данных автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса для модельных расчетов энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле: св-во о регистр. программы для ЭВМ, RU 201760487. 05.12.2016.
13. Козырева Л.В., Ситдикова Ю.Р., Ефимов А.Е., Доброхотов А.В. Методика оценки биологического водопотребления посевов для решения задач управления водным режимом // Агрофизика. № 4 (12). 2013. С. 12.
14. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 1998.
15. Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications // Agric. Water Manage. T. 46. No. 2. 2000. P. 137–155.
16. Якушев В.П., Козырева Л.В., Ситдикова Ю.Р., Доброхотов А. В., Ефимов А.Е. Автоматизация принятия решений при орошении // Вестник сельскохозяйственной науки. 2015. № 5. С. 8–10.
17. Козырева Л.В., Доброхотов А.В., Ситдикова Ю.Р., Ефимов А.Е. Методика оценки составляющих водного и теплового балансов в системе «почва–растение – приземный слой воздуха» с учетом стратификации приземного слоя, неоднородности подстилающей поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли и наземной калибровки автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом (АМПАК). ФГБНУ АФИ. Санкт-Петербург, 2015. 48 с.
18. Norman J.M., Kustas W.P., Humes K.S. Transactions of the ASABE approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature // Agric. Forest Meteorol. 1995. Vol. 77. No. 3–4. P. 263–293.
19. Jackson R.D., Kustas W.P., Choudhury B.J. A reexamination of the crop water stress index // Irrigation Science. 1988. Vol. 9. No. 4. P. 309–317.
20. Jackson R.D. Canopy temperature and crop water stress // Advances in irrigation. 1982. Vol. 1. P. 43–85.
21. Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J. & Pinter Jr P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator // Water resources research. 1981. Vol. 17. No. 4. P. 1133–1138.
22. Доброхотов А.В. Определение сроков полива с помощью индекса CWSI. // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 65–70.

Для цитирования: Козырева Л.В., Доброхотов А.В., рациональное использование водных ресурсов с автоматизированным расчетом полива посевов на орошаемом поле // Водное хозяйство России. 2020. № 1. С. 92–106.

Сведения об авторах:

Козырева Людмила Владимировна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Россия, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: 4ludak@gmail.com

Доброхотов Алексей Вячеславович, научный сотрудник, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Россия, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: dobralexey@gmail.com

RATIONAL USE OF WATER RESOURCES WITH AUTOMATED CALCULATION OF IRRIGATION NORMS AND TIMING FOR CROPS ON THE IRRIGATED FIELD**Lyudmila V. Kozyreva, Aleksey V. Dobrokhotov**

E-mail: 4ludak@gmail.com

Agro/physical Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Crop production is accompanied by a set of tasks, each of which for different soil and climatic conditions has its own characteristics and standards. Irrigation is one of the types of water reclamation in areas with insufficient and unstable natural moisture, aimed at preventing soil and partially atmospheric droughts. Determination of crops moisture supply and irrigation norms is the most important task when growing crops in arid regions. The objective of our work is to develop an automated information technology for decision-making during irrigation. The main indicators of moisture supply of the irrigated field is the reference, potential and actual evapotranspirations, crop water stress index. Indicators of moisture supply are determined according to the monitoring of agro/meteorological, physiological parameters of crops. For monitoring tasks in the Agro/physical Institute (St. Petersburg), an automated mobile field agro/meteorological complex (AMFAC) was created. The software of the complex allows real-time saving of synchronously measured data time series, which are used for automated calculation of reference, potential and actual evapotranspirations, crop water stress index and irrigation norms. As a result of the field experiments, methods for assessing the evapotranspiration and crop water stress index were tested. Automated information technology, including monitoring, the creation of a database, and computational algorithms for models of energy exchange in the «soil – plant – atmospheric surface layer» system can serve as the basis for an expert decision-making system for irrigation.

Key words: automated information technology, irrigation, indicators of crops moisture supply, evapotranspiration, energy balance equation, AMFAC.

About the authors:

Lyudmila V. Kozyreva, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Agro/physical Research Institute; 14, Grazhdancky prospect, St. Petersburg, 195220, Russia; e-mail: 4ludak@gmail.com

Aleksey V. Dobrokhotov, Researcher, Agro/physical Research Institute; 14, Grazhdancky prospect, St. Petersburg, 195220, Russia; e-mail: dobralexey@gmail.com

For citation: *Kozyreva L.V., Dobrokhotov A.V. Rational Use of Water Resources with Automated Calculation of Irrigation Norms and Timing for Crops on the Irrigated Field // Water Sector of Russia. 2020. No. 1. P. 92-106.*

REFERENCES

1. *Olgarenko G.V., Cekojeva F.K. Planirovanie ekologicheski bezopasnyh rezhimov orosheniya agrobiocenozov s uchetom izmenchivosti gidrometeorologicheskikh usloviy [Planning environmentally safe regimes of irrigation of agrobiocenosis taking into account variability of hydro/meteorological conditions] // Environmental engineering. 2012. No. 5. P. 7–11.*
2. *Resursosberegayushchiye energoeffektivniye ekologicheski bezopasniye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva orosheniya [Resource-saving energy-efficient environmentally friendly technologies and technical means of irrigation: a reference book]. Moscow: Federal State Scientific Institution Rosinformagrotekh, 2015. P. 264.*

3. *Davitaya F.F., Melnik Y. S.* Problem prognoza ispariyayemosti i orositelnykh norm [The problem of forecasting evaporation and irrigation norms]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. P. 72.
4. *Ostapchik V.P.* Planirovaniy e rezhimov orosheniya na osnove bioklimaticheskogo metoda rascheta vodopotrebleniya selskokhozyaystvennykh kultur [Planning of irrigation regimes based on the bioclimatic method of calculating the water consumption of crops] // Moscow, TsBNTIMinvodkhoza USSR. 1981. P. 90.
5. *Muromtsev N.A., Kovalenko P.I., Semenov N.A., Mazhaysky Y.A., Yatsyk N.V., Shuravilin A.V., Voropay G.V., Anisimov K.B., Kolomiets S.S.* Vnutripochvennyy vlogoobmen, vodopotrebleniye i vodoobespechennost mnogoletnikh kulturnykh travostoyev [Subsoil moisture exchange, water consumption and water supply of perennial cultivated grass stands]. Ryazan: 2013. P. 300.
6. *Efimov A.E., Kozyreva L.V.* Mobilniy agrometeorologicheskii informatsionno-izmeritelnyy kompleks [Mobile agro/meteorological information-measuring complex] // In the collection of the 4th International Scientific and Practical Conference «AGROINFO-2009». Siberian Physical – Technical Institute of Agrarian Problems of the Russian Agricultural Academy. Novosibirsk 2009. P. 276–277.
7. *Efimov A.E., Kozyreva L.V.* Programma dlya obrabotki eksperimentalnykh polevykh dannykh i vychisleniya agrometeorologicheskikh parametrov fitoklimata selskokhozyaystvennogo polya [The program for processing experimental field data and calculating the agro/meteorological parameters of the phyto/climate of an agricultural field]. Certificate of state registration of computer programs, № 2010616625, 10/05/2010.
8. *Efimov A.E., Kozyreva L.V.* Kompyuternaya programma dlya monitoringa etalonnay evapotranspiratsiyi selskokhozyaystvennogo polya s razlichnymi vremennymi intervalami (sutochnymi, chasovymi dnevnymi i nochnymi) [A computer program for monitoring reference evapotranspiration of the surface and potential reverse transport of an agricultural field at various time intervals (daily, hourly daytime and nighttime)]. Certificate of state registration of computer programs, № 2012610424, 10.01.2012.
9. *Efimov A.E., Sitdikova Y.R., Kozyreva L.V., Dobrokhotov A.V.* AMPAK (Avtomatizirovaniy Mobilniy Polevoy Agrometeorologicheskii Kompleks) [AMPAK (Automated Mobile Field Agro/meteorological Complex)]. Guidelines for use. Agro/physical Research Institute St. Petersburg, 2013.
10. *Efimov A.E., Sitdikova Y.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V.* Monitoring evapotsapiratsiyi na selskokhozyaystvennom pole, opredeleniye norm i srokov poliva avtomatizirovannym mobilnym polevym agrometeorologicheskim kompleksom [Monitoring evapotranspiration on the agricultural field, determining the norms and timing of irrigation by an automated mobile field agro/meteorological complex] // Water Resources. Vol. 45. No. 1. 2018. p. 100-105. DOI: 10.7868 / S032105961801008X.
11. *Maksenkova I.L., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V.* Parametricheskaya identifikatsiya modeli rosta i razvitiya AQUACROP na posevakh rapsa v Leningradskoye oblasti [Parametric identification of the AQUACROP growth and development model on rapeseed in the Leningrad Oblast] // Agrophysics. № 1. 2018. P. 44 – 53
12. *Kozyreva, L.V., Dobrokhotov, A.V., Efimov, A.E. Maksenkova, I.L., Bartenev, D.L.* Informatsionnaya baza dannykh avtomatizirovannogo mobilnogo polevogo agrometeorologicheskogo kompleksa dlya modelnykh raschetov energo- i massoobmena na selskokhozyaystvennom pole [Information database of an automated mobile field agro/

- meteorological complex for model calculations of energy and mass transfer in an agricultural field]. Certificate of registration of the computer program RUS 201760487 12/05/2016.
13. *Kozyreva, LV, Sitdikova, Y.R., Efimov, A.E., Dobrokhotov, A.V.* Metodika otsenki biologicheskogo vodopotrebleniya posevov dlya resheniya zadach upravleniya vodnym rezhimom. [Methodology for assessing biological water consumption of crops for solving water management problems] // *Agrophysics*. No. 4 (12). 2013. P. 12.
 14. *Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 1998.
 15. *Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W.* Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications // *Agric. Water Manage.* T.46. № 2. 2000. P. 137–155.
 16. *Yakushev V.P., Kozyreva L.V., Sitdikova Y.R., Dobrokhotov A.V., Efimov A.E.* Avtomatizatsiya prinyatiya resheniy pri orosheniyi [Automation of decision-making during irrigation] // *Bulletin of Agricultural Science*. № 5. 2015. P. 8–10.
 17. *Kozyreva, LV, Dobrokhotov, AV, Sitdikova, Y.R., Efimov, A.E.* Metodika otsenki sostavlyayushchikh vodnogo i teplovogo balansov v sisteme “pochva-rasteniye-prizemniy sloj vozdukh” s uchetom stratifikatsiyi prizemnogo sloya, neodnorodnosti podstilayushchey poverkhnosti s ispolzovaniyem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli i nazemnoy kalibrovki avtomatizirovannym mobilnym polevym agrometeorologicheskim kompleksom (AMPAK) [Methods of assessing the components of water and heat balances in the system «soil – plant – surface air layer» taking into account the stratification of the surface layer, heterogeneity of the underlying surface using data from Earth remote sensing and ground calibration by automated mobile field agro/meteorological complex (AMPAC)]. Agro/physical Research Institute. St. Petersburg, 2015. P. 48.
 18. *Norman J. M., Kustas W. P., Humes K. S.* Transactions of the ASABE approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature // *Agric. Forest Meteorol.* Vol. 77. No. 3–4. 1995. P. 263–293.
 19. *Jackson R.D., Kustas W.P., Choudhury B.J.* A reexamination of the crop water stress index // *Irrigation Science*. Vol. 9. No. 4. 1988. P. 309–317.
 20. *Jackson R.D.* Canopy temperature and crop water stress // *Advances in irrigation*. Vol. 1. 1982. P. 43–85.
 21. *Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., & Pinter Jr, P.J.* Canopy temperature as a crop water stress indicator // *Water resources research*. Vol. 17. No. 4. 1981. P. 1133–1138.
 22. *Dobrokhotov A.V.* Opredeleniye vremeni orosheniya s ispolzovaniyem indeksa CWSI [Determine the timing of irrigation using the CWSI index] // *Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture*. 2016. № 1 (61). P. 65–70.