МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЛАНИРОВАНИЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР



Москва ФГБНУ «Росинформагротех» 2014

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЛАНИРОВАНИЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Инструктивно-методическое издание

Москва 2014

УДК 631.675
ББК 65.45
П 37

Авторский коллектив:
Г.В. Ольгаренко, д-р с.-х. наук; **Т.А. Капустина**, канд. техн. наук;
Д.Г. Ольгаренко, канд. экон. наук; **Ф.К. Цекоева**, канд. с.-х. наук

Под общей редакцией
д-ра с.-х. наук **Г.В. Ольгаренко** (ФГБНУ ВНИИ «Радуга»)

Рецензенты:
Л.В. Кирейчева, д-р техн. наук, зам. директора по науке (ГНУ ВНИИГиМ);
А.И. Рязанцев, д-р техн. наук, проф. (МГОСГИ (Московский государственный областной социально-гуманитарный институт)

П 37 **Планирование водопользования при орошении сельскохозяйственных культур:** инстр.-метод. изд. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 172 с.

ISBN 978-5-7367-1023-2

Разработано на основе многолетних научных исследований ФГБНУ ВНИИ «Радуга» по методике и расчетным моделям для оперативного планирования водопользования при орошении с учетом пространственно-временной изменчивости природно-климатических факторов.

Предназначено для проектных и эксплуатационных организаций специализирующихся в области орошения сельскохозяйственных земель, сельскохозяйственных предприятий.

Рассмотрено и рекомендовано к изданию секцией мелиорации Научно-технического совета Минсельхоза России (протокол № 5 от 11 июля 2012 г.).

Planning of water use for crop irrigation: instructional and methodical publication. – Moscow: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2014. 172 pp.

The publication is developed on the basis of many years of research studies carried out by FGBNU BNII «Raduga» in line with the methodology and calculated models for operational planning of water use for irrigation taking into account a space-temporal variability of climatic factors.

The publication is discussed and recommended for publication by the Section of Land Reclamation of the Scientific and Technical Council, Ministry of Agriculture of Russia (Minutes No 5 dated July 11, 2012).

УДК 631.675
ББК 65.45

ISBN 978-5-7367-1023-2

© Минсельхоз России, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Орошаемые земли во всем мире являются одним из главных факторов обеспечения стабильности сельскохозяйственного производства и продовольственной безопасности. На орошаемых землях, составляющих менее 20% площади пашни, производится более 40% продукции растениеводства.

Прогнозируемый ФАО рост мировых орошаемых площадей на 1-2% в год в ближайшие 20 лет может привести к увеличению их до 350 млн га, урожайности по зерну на 25%, потребления энергии на 50, ресурсов на 40, запасов пресной воды на 20%, что делает актуальными проблемы экономии водных, энергетических и материально-технических ресурсов, охраны природной среды. Во всем мире ведутся научно-исследовательские работы по повышению эффективности использования водных ресурсов, разработке водосберегающих, энергоэффективных технологий и техники орошения.

В России, где более 70% всех сельскохозяйственных угодий расположены в зонах недостаточного или неустойчивого естественного увлажнения, стабильно высокий уровень производства сельскохозяйственной продукции может быть обеспечен благодаря орошению сельскохозяйственных земель. Выход продукции с орошаемого гектара в 2-5 раз выше, чем с богарного, а производительность труда, эффективность использования природных и материально-технических ресурсов, в том числе удобрений, увеличиваются в 2-3 раза.

Орошаемые земли, составляя менее 5% площади пашни, дают от 10 до 20% всего урожая. Более 80% овощей, 20% кормов и весь рис производятся на орошаемых землях.

Эффективность использования водных ресурсов в орошаемом земледелии остается низкой. Коэффициенты полезного действия гидромелиоративных систем составляют менее 0,65 на 40% общей площади орошения, 0,65-0,8 – на 26 и более 0,8 – на 9%. Соответственно потери воды в оросительной сети, являвшиеся одной из основных причин ухудшения экологической обстановки на орошаемых землях, составляют от 25 до 60% от величины водозабора. Следует отметить, что даже при самом высоком техническом уровне оросительных систем неэффективное управление орошением

приводит к значительным потерям воды на сток и инфильтрацию, нерациональному расходованию энергетических, материально-технических ресурсов и ухудшению экологической обстановки.

Важным резервом повышения эффективности орошения является совершенствование оперативного планирования поливов на основе учета почвенно-климатических факторов и приведения в соответствие технико-эксплуатационных параметров дождевальных машин и оптимальных режимов орошения сельскохозяйственных культур. Решение задачи оперативного планирования эксплуатационных режимов орошения включает в себя совершенствование методов определения сроков и норм поливов, а также разработку организационно-технических мероприятий по их реализации – информационно-советующих систем.

Информационно-советующая система, использующая комплекс программ, обрабатывает информацию по заданным алгоритмам. Результаты обработки поступают на выводное устройство в виде совета. Оператор использует эту информацию и с учетом дополнительных сведений, поступающих по другим каналам, вырабатывает управляющее воздействие. Таким образом, информационно-советующая система, наряду с выдачей информации и фиксацией необходимых характеристик объекта и процессов, подготавливает определенные предложения и рекомендации оператору, например режим и график работы в данной конкретной ситуации. При этом окончательное принятие решений остается за человеком.

Оперативное планирование эксплуатационных режимов орошения с использованием математических моделей и компьютерной технологии повышает точность планирования режимов орошения, что обеспечивает повышение коэффициента полезного действия гидромелиоративных систем, снижение потерь воды на фильтрацию и поверхностный сток, экологическую безопасность природной среды и ресурсосбережение.

1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕЛИОРАЦИИ

1.1. Научно-технические разработки в области информационных технологий планирования водопользования

В России и за рубежом существует множество разнообразных информационных систем и моделей оперативного планирования орошения, реализуемое качество управления в которых зависит от технического уровня средств коммуникации, вычислительных машин, а также от того, насколько точно комплекс применяемых моделей и расчетных методов отражает процессы, происходящие на полях в конкретных почвенно-климатических условиях.

В ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии [5, 6] разработана математическая модель для оптимального распределения водных ресурсов при их дефиците, включающая в себя систему математических моделей оперативного планирования водораспределения со сложной иерархической структурой.

«Система программированного выращивания урожаев» (СПВУ) [42], разработанная в главном информационно-вычислительном центре Россельхозакадемии включает в себя блок для расчета влажности почвы и режимов орошения. Исходная информация содержит данные о метеорологических условиях, осадках, стадии развития растений, на основании которой, с применением уравнения водного баланса, рассчитывается влагообеспеченность растений и величина поливных норм в конкретные временные интервалы.

ВНПО «Радуга» в 1988 г. разработана и внедрена технологическая служба оперативного управления поливами (ОУП) на внутрихозяйственных системах с площадью обслуживания до 30 тыс. га [9, 51].

В 1990 г. на оросительных системах Казахстана Казахским НИИ водного хозяйства проводились под руководством Р.А. Квана разработка и внедрение основ оперативного управления поливами и организации водопользования.

Аналогично решается задача управления орошением в региональной системе оперативного планирования поливов, разработанной в ФГБНУ «РосНИИПМ».

С помощью созданной в 1990 г. АСУ ОС управление орошением впервые осуществляется на основе динамической модели водного режима и урожайности сельскохозяйственных культур. В 2002 г. разработаны программные средства и система информационно-технологической поддержки служб эксплуатации оросительных систем по управлению процессами водопользования и водораспределения (Щедрин В.Н., Яновский А.С., Колганов А.В.).

Опытно-производственная проверка методик и программ по оперативному управлению использованием оросительной воды в хозяйствах, разработка и внедрение методики по оперативному планированию и корректировке внутрихозяйственного водопользования проводились в 1988 г. (Ольгаренко В.И.).

Работы по оперативному управлению поливами с 1988 г. проводились ВНИИ комплексной автоматизации мелиоративных систем (руководитель разработок Е.Г. Крушель). Рассматривался комплекс задач оперативного планирования водопользования на оросительных системах Крымского УОС Краснодарского края. Разработано программное обеспечение комплексов задач оперативного планирования и управления технологическими процессами на уровне Крымского РУОС и Ленинградского РПО «Полив».

Комплексная физико-статистическая модель, разработанная М.Г. Санояном [39], учитывает динамику роста корневой системы и агрометеорологические условия влагообмена в среде обитания растений. Решение основано на функциональной зависимости:

$$W = Ф\ (М,П,Б),$$

где W – влагозапасы почвы;

$Ф$ – символ функциональной зависимости;

$М$, $П$, $Б$ – соответственно показатели метеорологических, почвенных и биологических факторов для расчетного периода.

Данная модель представляет собой систему, в которой объединены вероятностно-статистические модели, обобщающие материалы специально поставленных многофакторных экспериментов, а также детерминированные модели, описывающие физические законы формирования их параметров.

Система стохастических и детерминированных математических моделей В.В. Шабанова позволяет оценить влияние на развитие растений водного и радиационного режимов посевов, почвенных влагозапасов и определить проектный режим орошения на основе решения уравнения водного баланса.

А.Ю. Черемисиновым предложена модель для расчета эксплуатационных режимов орошения в условиях Центрально-Черноземной зоны, которая позволяет учитывать влияние изменчивости климатических факторов на суммарное испарение.

В.П. Остапчиком и В.А. Костроминым [34] приведены схемы решения задач оперативного планирования режимов орошения на крупных орошаемых массивах с помощью ЭВМ. Описанный комплекс моделей успешно прошел производственную проверку в Киевской, Херсонской областях Украины и Крыму.

Ю.А. Израэлем и О.Д. Сиротенко [16] разработана имитационная система «климат-почва-урожай».

В.В. Альт (СибФТИ) в своих работах [3] отмечает необходимость всемерного развития применения информационных технологий в сельскохозяйственном производстве России.

Аналогичные модели разрабатываются за рубежом, где значительное внимание уделяется вопросам повышения эффективности управления орошением. В последние годы разработаны центральная система ISS, а также региональные системы управления: Irrigat, ISI, IMS, CIMIS, AGMET, VISP. Модели предусматривают получение информации о параметрах поля, возделываемой культуре, оросительной системе и общих климатических показателях, позволяют управлять поливами на оросительных системах различных типов при различной структуре севооборотов с учетом конкретных почвенно-климатических условий.

Информационно-советующая система оценки мелиоративного и агрохимического состояния орошаемых севооборотных участков (ФГУ «Управление Саратовмелиоводхоз», ИСС «Участок») предназначена для оценки показателей состояния мелиорируемых земель Поволжья на наименее разработанном локальном уровне для отдельных орошаемых полей хозяйства, базирующаяся на принципах геопространственности и комплексности. База данных и знаний ИСС «Участок» включает в себя 14 реляционных файлов формата dBase IV (табл. 1), позволяющих ввести данные о состоянии кон-

кретного орошаемого участка и определить условия возделывания полевых культур на нем.

Таблица 1

Перечень реляционных файлов ИСС «Участок»

Название	Содержание
FAKTOR	Справочник показателей агромелиоративной ситуации
STEPEN	Справочник классификационных оценок показателей
METEO_EL	Декадные осадки, температуры и дефициты влажности воздуха за 30 лет
SC01_PRA	Файл правил сценария ИСС, определяющий сценарий консультации
FORM1	Файл описаний экранных форм
ERROR	Правила обработки ошибок в процедурных правилах базы знаний ИСС
SPR_OBL	Справочник областей
SPR_RAI	Справочник административных районов
SPR_STAN	Справочник 30 метеостанций с обобщенными климатическими данными
KL01_PRA	Набор процедурных правил оценки агрохимического состояния
KL02_PRA	Набор процедурных правил оценки мелиоративного состояния
KL03_PRA	Набор процедурных правил оценки содержания гумуса
UTH	Файл описаний участков
HELP	Файл организации контекстно-ассоциативной подсказки

В результате работы ИСС «Участок» пользователю выдается описание состояния интересующего поля орошаемого участка, содержащее качественные оценки его агрохимического и мелиоративного состояния.

Форматы и структура реляционных файлов ИСС «Участок» обеспечивают возможность их сопряжения с атрибутивными базами данных ГИС-мониторинга (географическая информационная система) мелиоративного состояния мелиорируемых сельскохозяйственных угодий региона.

ГИС широко применяются для оперативного управления поливами. Использование ГИС обеспечивает уникальные возможности для решения широкого спектра задач, связанных с анализом и прогнозом явлений и событий окружающего мира, с осмыслением и выделением главных факторов и причин, а также их возможных последствий, с планированием стратегических решений и текущих последствий предпринимаемых действий.

Особенно интенсивное развитие технологии ГИС началось в 1987 г., в том числе в России. В настоящее время наблюдается стремительное продвижение геоинформационных технологий, произошло осознание того, что многие проблемы управления территорией связаны с географической информацией и естественным путем их решения является применение концепции ГИС.

Немаловажную помощь в управлении сельскохозяйственным производством на различных уровнях оказывают уникальные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Важнейшей задачей, которую в первую очередь необходимо решать с помощью данных ДЗЗ в аграрном секторе, является инвентаризация сельхозугодий.

Методы ДЗЗ широко используются в агропромышленном комплексе многих стран мира (США, Канада, страны Евросоюза, Индия, Япония и др.).

В России разрабатывается национальная космическая система дистанционного зондирования Земли для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. Работа ведется в рамках Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования.

Важной и перспективной областью применения технологии ДЗЗ в аграрной сфере является мониторинг сельскохозяйственных культур. Они отлично отображаются на космических снимках, ничем не скрыты, одноярусны, хорошо дешифрируются.

Особенное значение методы ДЗЗ приобретают в таком относительно новом направлении сельского хозяйства как точное земледелие, для которого важен постоянный контроль за состоянием растительности. Данные ДЗЗ для оперативного реагирования на ситуацию являются незаменимыми.

Новое качество систем управления может быть достигнуто путем внедрения средств мониторинга, способных обеспечить мгно-

венное реагирование на изменение ситуации. Новые системы смогут не только предупреждать о возможных последствиях, но и давать рекомендации по преодолению кризиса и нормализации обстановки.

1.2. Концепция совершенствования методов планирования орошения и водопользования

Для регулирования водного режима агроландшафтов в диапазоне, обеспечивающем рациональное использование водно-энергетических ресурсов и экологическую безопасность, необходима организация такой системы управления орошением, которая на основе достоверной информации позволяет нормировать величину управляющих воздействий, обеспечивающих оптимальный уровень продуктивности агроценозов и соответствующих требованиям охраны окружающей среды [59-61].

Сложность решения сформулированной задачи состоит в том, что процессы водопотребления и водораспределения в орошаемом земледелии с бóльшим трудом поддаются формализации, чем в других отраслях производства из-за сильной зависимости их от почвенно-климатических условий и внешних случайных факторов, высокой степени безвозвратного использования воды, рассредоточения водопотребителей на больших площадях, неравномерности водопотребления во времени и необходимости согласования с потребностями культур [5, 62-63].

Современный уровень развития математического моделирования, совершенствование вычислительной техники, средств коммуникации позволяют в значительной степени преодолеть эти трудности, в связи с чем компьютерные технологии и математическое моделирование находят все более широкое применение в практике орошаемого земледелия.

В России и за рубежом существует множество информационных систем и моделей оперативного планирования орошения, реализуемое качество управления в которых зависит как от технического совершенства вычислительной техники, так и от того, насколько комплекс применяемых моделей адекватен процессам, происходящим на полях в конкретных почвенно-климатических условиях. При управлении орошением необходимо обеспечить поддержание

влажности почвы в пределах оптимального диапазона, обеспечивающего планируемую продуктивность агроценозов, а также экономное использование воды, материально-технических, энергетических и информационных ресурсов. Все это требует получения объективной информации о выпадении осадков, режимах проведения поливов, динамике испарения, особенностях влагообмена в зоне аэрации, агроклиматических условиях и влагозапасах почвы [64, 68-71].

Широкое распространение получили методы, где учет климатических условий осуществляется посредством использования среднесуточных температур воздуха с учетом продолжительности дня, радиационного баланса, суммарной радиации, влажности воздуха. Следует иметь в виду, что на точность методов влияет изменчивость коэффициентов культур, входящих в расчетные зависимости вследствие того, что суммарное испарение может изменяться в широких диапазонах климатических условий с одинаковыми значениями температуры воздуха и длины дня. Даже в условиях одного региона, в зависимости от влагообеспеченности конкретного года, величины испарения и испаряемости могут различаться на 10-30% при почти одинаковых температурах.

В ряде расчетных методов влияние метеорологических условий учитывается более надежно на основе метода теплового баланса орошаемого поля. Однако поливные нормы и в этих методах определяются с помощью эмпирических коэффициентов.

Недостаточная точность эмпирических параметров ведет к ошибкам в расчетах режима орошения до 30%. Кроме того, формулы для оценки оптимально увлажненной почвы не учитывают влияние снижения ее влажности на депрессию испарения [57, 67].

Ряд методик расчета основан на уравнениях связи составляющих теплового и водного балансов [77, 78]. Эти уравнения – результат аналитической аппроксимации эмпирических связей, полученных в естественных условиях между составляющими водного и теплового баланса. В данных формулах используются эмпирические коэффициенты, без учета их изменчивости при изменении условий влагообеспеченности, что может приводить к существенным ошибкам. Ограничивает применение таких формул недостаточная надежность учета коэффициентов культур, биологических особенностей водопотребления растений при расчете суммарного испаре-

ния в разные фазы развития растений при различной влажности корнеобитаемого слоя почвы.

К этой группе могут быть отнесены комплексные методы, в которых используются одновременно элементы водного и теплового баланса, а также эмпирические коэффициенты. Достоинством данных методов является возможность оценки влияния влагообеспеченности посевов на соотношение суммарного испарения и испаряемости, но испарение в этом случае принимается пропорциональным влагозапасам почвы во все фазы развития растений, что неверно с точки зрения физиологии растений. На различных этапах онтогенеза избыток или недостаток влаги по-разному сказывается на приросте биомассы и интенсивности испарения сельскохозяйственных культур. Для повышения точности расчетов требуется оценка изменчивости коэффициентов влияния биологических особенностей культур на их водопотребление. Следует также учитывать тот факт, что прямая пропорциональность между влагозапасами и водопотреблением часто нарушается в природе. Принятие такой зависимости между влагозапасами и водопотреблением и отсутствие данных о возможных изменениях по фазам развития растений может привести к значительным ошибкам. При малых запасах влаги в почве водопотребление соответственно снижается, при оптимальных – результаты получаются удовлетворительными.

Использование биологических кривых (биологических коэффициентов культур) для нормирования орошения – наиболее обоснованный и универсальный метод. Он учитывает основные факторы, определяющие величину водопотребления сельскохозяйственных культур, их биологические особенности, погодные условия и влагозапасы почвы [87]. Биологические кривые должны строиться по экспериментальным данным о водопотреблении, испаряемости, влагозапасах почвы и фазах развития растений в два этапа. На первом этапе строится семейство кривых зависимости коэффициентов культур (биологических коэффициентов) от влажности почвы по отдельным фазам развития растений. Затем строятся кривые, максимальные ординаты которых в процессе онтогенеза представляют собой собственно биологические кривые водопотребления растений. В этом случае биологические кривые становятся зональными, устойчивыми по количественным характеристикам интенсивности водопотребления сельскохозяйственных культур, сложившимся в

процессе адаптации данной культуры к условиям ее формирования. Такие кривые по определению и физическому смыслу являются универсальными, неизменными по территории. На практике, однако, попытки получения таких кривых не увенчались успехом. При этом биологические коэффициенты становятся зональными – биоклиматическими, изменчивыми во времени и пространстве [57].

Оценка изменчивости биоклиматических коэффициентов для условий Заволжья показывает, например, что различия коэффициентов в засушливые и влажные годы вытекают из использования прямолинейной зависимости между испарением и дефицитом влажности воздуха [80]. В засушливые годы дефицит влажности воздуха возрастает значительно быстрее, чем суммарное испарение, и прямолинейная зависимость нарушается. Основная трудность при использовании формул заключается в многообразном сочетании климатических условий (дефицитов влажности воздуха, температур и т.д.) даже при прохождении одной и той же фазы развития растений в разные годы. Требуется такое построение формулы, при котором действительно исключалась бы возможность разнохарактерного изменения рассматриваемых величин. Поэтому эмпирическая формула для расчета является сугубо региональной и с успехом может быть использована только в тех природных условиях, для которых получена.

После проведения экспериментальных исследований Д.Б. Циприс, Э.Г. Евтушенко [81] пришли к выводу, что биологические коэффициенты не могут считаться характеристикой только биологических особенностей водопотребления культуры. Скорее всего, это характеристика отзывчивости водопотребления культуры на изменение гидрометеорологических условий произрастания, более того, это обусловлено отличиями гидрометеорологических условий конкретного года от средних многолетних. Для уточнения расчетов установлены уравнения связи изменчивости коэффициентов в зависимости от изменения гидротермического коэффициента.

По мнению А.П. Кочеткова [82], большая декадная изменчивость биоклиматических коэффициентов связана со значительной изменчивостью климатических условий по годам за отдельные декады, а также погрешностью полевых исследований. Средний коэффициент вариации для биоклиматических коэффициентов за вегетацию равен 10-19%, а в течение вегетационного периода для

каскадных значений в различные годы – от 24 до 71%. Для повышения устойчивости коэффициентов вариации и точности расчета предлагается использовать относительные показатели, которые отражают характер водопотребления в соответствии с ритмами развития растений и изменением климатических факторов в их комплексном взаимодействии.

Ш. Угрехелидзе [83] предложено уравнение, учитывающее изменение коэффициентов биологической кривой с учетом биологических особенностей сельскохозяйственных культур, почвенных условий, влажности почвы и основных метеорологических факторов.

Изменение биоклиматических коэффициентов по зонам и во времени вносит элемент неопределенности при выборе их величины для расчета водопотребления биоклиматическим методом. Факторы, определяющие их величину – урожай сельскохозяйственных культур, плодородие почвы, уровень применяемой агротехники, техника полива. В производственных расчетах необходимо дифференцировать биоклиматические коэффициенты в зависимости от природных и хозяйственных особенностей рассматриваемого массива.

Исследования Э.А. Струнникова [84] подтверждают изменчивость биоклиматических коэффициентов, описываемую степенной зависимостью, с изменением показателя степени от нуля до единицы. Изменчивость биоклиматических коэффициентов как пространственная, так и временная, объясняется рядом причин: созданием в среде растений своеобразного фитоклимата, динамикой испарения с почвы при различном ее увлажнении, особенностями процесса испарения в контрастных климатических зонах, резкими изменениями погоды в одной и той же климатической зоне. С целью повышения точности расчетов для различных почвенно-климатических условий необходимо рассчитать семейство региональных кривых водопотребления основных культур. Существенное значение имеет при этом изучение закономерностей изменчивости биологических коэффициентов во времени, поскольку погодные условия в отдельных климатических зонах страны имеют резкие колебания во времени и пространстве.

По мнению В.П. Остапчика [34], основной причиной пространственной изменчивости коэффициентов является недостоверность исходных данных, пространственная изменчивость влагозапасов, осадков, влагообмена активного слоя с подстилающими слоями,

степень сухости окружающей территории, неучет всплесков испарения после поливов, а также использование пропорциональной связи между испарением и дефицитом влажности воздуха. Усовершенствование методики может заключаться в использовании коэффициентов, учитывающих влияние на испарение таких факторов, как скорость ветра, влажность почвы, всплески испарения, размеры орошаемых полей.

В.Б. Местечкиным [85] установлено, что биологические коэффициенты ($К_б$) подчиняются географической зональности, убывая с увеличением засушливости климата от 0,7 до 0,2. Использование фиксированных наборов биологических коэффициентов для расчетов водопотребления в почвенно-климатических неоднородных регионах приводит к ошибкам, достигающим 50%. Во избежание таких ошибок в регионах, для которых отсутствуют экспериментальные данные, следует пользоваться при расчетах пространственной интерполяцией, методика которой разработана в зависимости от сумм дефицитов влажности воздуха.

М.Г. Голченко и В.И. Вихровым [86] уточнена биоклиматическая модель водопотребления с учетом нелинейной связи, а также скорости ветра, увеличения эвапорации, изменения урожайности по укосам многолетних трав. При этом отклонения рассчитанных величин суммарного испарения от измеренных не превышали 12,4%.

Установлено, что величина биоклиматических коэффициентов, соответствующих дефициту влажности воздуха и испарению с водной поверхности, возрастает при переходе от южных регионов к северным. Различия в уровне влажности почвы приводят к разной величине биоклиматических коэффициентов даже на участке с одинаковыми климатическими условиями. Поэтому с целью увеличения точности расчетов предлагается дифференцировка коэффициентов по климатическим зонам с учетом влагообеспеченности посевов.

Биоклиматические коэффициенты отражают влияние на водораспределение двух факторов: биологических ритмов развития и метеорологических условий. Зависимость биоклиматических коэффициентов от погодных условий устанавливается по отклонениям фактических значений биоклиматических коэффициентов и среднесуточных дефицитов влажности воздуха от средних их зна-

чений. Установлено, что биоклиматические коэффициенты зависят от уровня урожайности.

С.А. Яковлев [87] предложил переходные коэффициенты, позволяющие получать величину водопотребления в годы с различной влагообеспеченностью по характеристикам изменения средних многолетних расчетных норм водопотребления. Эти величины представляют собой отношение величин водопотребления в заданный год к величине водопотребления в «средний» по обеспеченности год.

Модель биоклиматических коэффициентов для расчета эксплуатационных режимов орошения в условиях Центрально-Черноземной зоны предложена А.Ю. Черемисиновым [68]. В основе ее – биоклиматический метод, уточненный при учете изменчивости биоклиматических коэффициентов в зависимости от изменчивости метеорологических условий. Для расчета используется информация о температуре и влажности воздуха, виде и фазе развития сельскохозяйственных культур, влагообеспеченности посевов, средняя относительная ошибка расчетов составляет +10,7....+14,2%.

В ряде моделей для повышения точности расчетов учитывается влияние влагообеспеченности посевов на суммарное испарение, причем эта зависимость принята прямолинейной [88-90]. Авторы считают, что различия в уровне влажности почвы оказывают влияние на величину суммарного испарения даже при одинаковых климатических условиях. Поэтому уточнение методики расчета сводится к оценке влияния влагообеспеченности посевов на биологические коэффициенты и суммарное испарение.

А.И. Михальцевичем и А.Е. Жуковым [89] предложена модель расчета суммарного испарения, позволяющая учитывать влияние влагосодержания почвы и фазы развития сельскохозяйственных растений.

Методика расчета водопотребления сельскохозяйственных культур (автор Л.Г. Балаев) позволяет учесть разные уровни урожайности и увлажнения, а также нелинейность связи между суммарным испарением и климатическими факторами. Кроме того, она позволяет рассчитать суммарное испарение для конкретных климатических, почвенно-гидрологических условий региона и биологических особенностей сельскохозяйственных культур.

Ю.Ф. Душаткиным подтверждено, что соотношение между испаряемостью с водной поверхности (E_w) и суммарным испарением (ET) с орошаемого поля зависит от влагозапасов в почве. Связь между E_w и ET прямолинейна до некоторого критического значения влажности почвы ($W_{кр}$), выше которого она приобретает криволинейный вид.

Аналогичные модели разрабатываются за рубежом, где также уделяется большое внимание вопросам повышения эффективности управления орошением.

В последние годы разработана централизованная система ISS, а также региональные системы управления Irrigat, ISI, IMS, CIMIS, AGNET, VISP [71, 73-74]. Модели предусматривают получение информации о водно-физических свойствах почвы орошаемого поля, возделываемой культуре, типе оросительной системы, гидрометеорологических условиях. Информационно-советующие системы для управления поливами позволяют планировать поливы на оросительных системах с учетом особенностей структуры севооборотов, конкретных почвенно-климатических и погодных условий. С использованием уравнений Х.Б. Блейни-В.Д. Криддла, Пристли-Тейлора, Х.Л. Пенмана, Л. Тюрка разработаны системы, которые дают возможность определять потенциальную эвапотранспирацию, дефицит почвенной влаги, оптимизировать режим орошения сельскохозяйственных культур на основе комплексной информации о метеорологических, почвенных и агрономических условиях.

Для перечисленных моделей базовая информация включает в себя название хозяйств, код возделываемой культуры и участка, даты посева, КПД поливной техники, максимальные запасы доступной влаги в корнеобитаемой зоне почвы. Метеорологическая информация содержит данные о солнечной радиации, температуре воздуха и точки росы, скорости ветра, дефиците влажности воздуха и т.д., текущая информация – данные о дате предыдущего полива, допустимом снижении запасов влаги в данную фазу вегетации культуры, дате выпадения последнего дождя в течение расчетного периода, количестве влаги, поступившей с осадками и поливом за рассматриваемый период.

По мнению авторов, одним из существенных недостатков расчетных методов является отсутствие количественной информации о влиянии влагообеспеченности посевов на суммарное испарение.

В реальных условиях производства при высокой стоимости материально-технических и энергетических ресурсов, а также экологически щадящих режимах орошения, поддерживать влажность корнеобитаемого слоя на оптимальном уровне не всегда представляется целесообразным и возможным. В связи с этим одинаковые периоды развития растений могут в разные годы проходить при различной влагообспеченности. С целью увеличения точности расчета суммарного испарения в таких случаях необходимо учитывать его депрессию при недостаточной влагообеспеченности.

Таким образом, проведенный анализ и результаты исследований ФГБНУ ВНИИ «Радуга» дают возможность сформулировать концепцию, утверждающую, что только разработка методов расчета, использующих комплексную информацию о метеорологических, почвенных, гидрогеологических условиях, биологических особенностях сельскохозяйственных культур, влажности почвы в сочетании с применением закономерностей статистического анализа и теории вероятностей для оценки характера изменчивости гидрометеорологических факторов, может служить практической основой для рациональной организации управления поливами, обеспечивающей высокую эффективность и экологическую безопасность технологий орошения [17].

Основные принципы совершенствования методики планирования орошения, заключаются в следующих положениях.

1. Рационализация водопотребления в сельском хозяйстве представляет собой одну из важнейших проблем, так как применение необоснованно завышенных оросительных норм приводит к нарушению водного режима и гидрохимического равновесия, дополнительному питанию грунтовых вод, их подъему, вымыванию из почвы минеральных и органических соединений и ухудшению экологической обстановки. Для обеспечения рационального потребления оросительной воды при проведении поливов требуется точное определение степени влагообеспеченности конкретного поля. Это позволяет своевременно назначать очередной полив, контролировать влагозапасы, расходование воды на образование урожая и не допускать непродуктивных потерь ее на поверхностные и глубинные сбросы.

2. Управление режимом поливов сводится к определению почвенных влагозапасов орошаемого участка на начало и конец рас-

четного периода. Если инструментальное определение количества осадков, метеорологических показателей вполне доступно, то инструментальное определение влажности почвы не может обеспечить объема информации, необходимого для массовой корректировки поливных режимов. Поэтому изменение влагозапасов определяют по уравнению водного баланса с расчетом суммарного испарения на основе математических моделей.

Главные требования, предъявляемые к моделям, заключаются в необходимости достаточно точного отражения изменений режима влажности посевов. В качестве параметров корректировки должны выступать данные, поддающиеся методам статистического анализа, которые можно получить в массовых наблюдениях воднобалансовых и агрометеорологических станций, простота их реализации.

3. Компьютерные технологии являются надежным инструментом для решения задач планирования и управления только при оперировании достоверной исходной, управляющей и контролирующей информацией. В связи с этим при обосновании математических моделей очень важен вопрос отбора наиболее информативных параметров, характеризующих динамику водного режима посевов, оценка их изменчивости при изменении условий внешней среды, величины оросительных норм и режима водоподачи на поливной участок.

4. Точность нормирования орошения зависит от точности определения суммарного испарения и характеристик влагообмена в зоне аэрации. Наиболее существенно повышает точность математических зависимостей учет нелинейности связи между величиной депрессии испарения и недостатком почвенной влаги в конкретные фазы развития растений, количественная оценка вероятностного характера этой связи.

5. Высокая точность расчетных методов возможна лишь тогда, когда складываются гидрометеорологические условия, при которых получены экспериментальные параметры математических зависимостей. При существующей методике организации полевых опытов колебания гидрометеорологических условий в годы экспериментальных исследований накладываются на биологические особенности фаз развития и не позволяют при рассмотрении динамики процесса выделить влияние на суммарное испарение биологических особенностей растений в разные стадии онтогенеза. Ис-

пользование средних многолетних значений биоклиматических коэффициентов без учета их изменчивости приводит к значительным ошибкам при расчетах для конкретных интервалов времени. Тем более, что даже при соответствии экспериментальных и «средних» климатических характеристик внутрисезонная изменчивость их в каждый конкретный год значительно различается. Необходима разработка усовершенствованной методики организации экспериментальных исследований, которая позволила бы получить точную количественную информацию, достоверно характеризующую изменчивость биоклиматических коэффициентов в связи с изменчивостью гидрометеорологических условий.

6. Применение математических моделей для управления орошением требует проведения научных исследований как по обоснованию расчетных зависимостей, так и по определению эмпирических параметров (биоклиматических коэффициентов) с использованием методов статистического анализа.

Экспериментальные исследования для совершенствования расчетных методов нормирования орошения должны решать следующие задачи:

• количественная оценка влияния гидрометеорологических условий, водного режима почвы на суммарное испарение и урожайность сельскохозяйственных культур;

• получение данных об интенсивности влагообмена в зоне аэрации и структуре водного баланса агроценозов при различных гидрометеорологических условиях;

• изучение структуры теплоэнергетического баланса посевов сельскохозяйственных культур для точной оценки влияния агрометеорологических условий в различные фазы развития растений на формирование суммарного испарения и урожайности.

2. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ОРОШЕНИЯ

2.1. Расчет режимов орошения по многолетним данным гидрометеорологических наблюдений

Периодическое увлажнение почвы за счет естественных осадков является наиболее характерным вариантом формирования режима орошаемых земель в степной и сухостепной зоне. Уровень влагозапасов почвы во времени изменяется от влажности разрыва капиллярных связей до полной влагоемкости. Однако для орошаемых и неорошаемых участков показатели увлажнения различны. На богарных участках тип водного режима непромывной, а для орошаемых участков характерны пространственно-временные колебания типов водных режимов почвы от непромывного до промывного.

В орошаемом земледелии проведение поливов должно регулировать влажность почвы так, чтобы обеспечивалась максимальная продуктивность сельскохозяйственных угодий в конкретных природных и агротехнических условиях при экономном использовании водно-энергетических ресурсов и минимизации отрицательного воздействия на почвенное плодородие и окружающую среду. При достаточных ресурсах главная задача орошения – поддержание запаса влаги в активном слое в пределах границ оптимального диапазона роста и развития растений. Максимальные урожаи сельскохозяйственных культур наблюдаются при изменении влажности почвы в пределах 0,8-1 наименьшей влагоемкости.

Поэтому основным критерием, на который ориентируются при управлении орошением, является динамика запасов почвенной влаги в расчетном слое почвы. Изменение запасов влаги за расчетный период (мм):

$$W_K = W_H + P + M + G - ET - J,$$

где W_K, W_H – влагозапасы почвы на конец и начало расчетного периода;

P – осадки;

ET – суммарное испарение, являющееся функцией от испаряемости Е и вида и этапа развития агробиоценоза;

M – оросительная норма;

G, J – величины подпитки и инфильтрации грунтовых вод.

Таким образом, обязательным условием точного управления поливами (поддержания влажности почвы в оптимальном диапазоне) является наличие достоверной информации о динамике влагозапасов почвы.

Суммарное испарение является основным расходным элементом в водном балансе орошаемого поля, и его интенсивность во многом определяет динамику режима корнеобитаемого слоя почвы. Поэтому точность определения величины суммарного испарения является решающим фактором, влияющим на точность оценки динамики влагозапасов, а следовательно, и на точность расчета поливных и оросительных норм. Суммарное испарение с высокой точностью может быть определено инструментальными методами (теплового, водного баланса), но на практике применение этих методов затруднено.

Для оптимизации управления орошением используют информационно-советующие системы оперативного планирования орошения, основанные на применении математических моделей, которые обеспечивают возможность расчета и прогнозирования динамики водного режима посевов и суммарного испарения и на основании этого управления эксплуатационными режимами орошения.

Реализуемая эффективность управления зависит как от уровня обеспеченности пользователей средствами связи и вычислительной техники, так и от качества самих моделей. Качество же математических моделей зависит от точности определения суммарного испарения, величины которого рассчитываются с использованием корреляционных связей его с метеофакторами и биологическими особенностями растений, учитывающих биоклиматические коэффициенты.

2.1.1. Испаряемость

Одним из показателей тепло-, влагообеспеченности, отражающим комплексную характеристику внешней среды, ее энергетические ресурсы, является испаряемость. Под испаряемостью понимают максимально возможное испарение при неограниченном притоке влаги к испаряющей поверхности.

Из множества методов определения испаряемости, теоретически и экспериментально обоснованных, рекомендуется метод ФГБНУ ВНИИ «Радуга», в котором используется формула, выведенная на основе модели Н.Н. Иванова с добавлением динамической составляющей:

$$E = K_t \cdot d \cdot f(v),$$

где E – испаряемость, мм;

K_t – энергетический фактор испарения, мм/мб;

d – дефицит влажности воздуха, мб;

$f(v)$ – ветровая функция, учитывающая влияние скорости ветра на интенсивность испарения.

Входящие в формулу компоненты определяются по следующим зависимостям:

$$K_t = 0{,}0061\ (25 + t)^2\ \ell_a^{-1},$$

где t – среднесуточная температура воздуха за расчетный интервал, °С;

ℓ_a – упругость насыщенного пара при этой температуре, мб;

$$d = \ell_a\ (1 - 0{,}01\ A),$$

где A – относительная влажность воздуха, %;

$$f(v) = 0{,}64\ (1 + 0{,}19\ V_2),$$

где V_2 – скорость ветра на высоте 2 м от поверхности земли, м/с.

Расчеты испаряемости по метеостанциям производятся за теплый период года с t° воздуха выше 5°С. По каждой метеостанции устанавливается хронологический ряд, статистическая обработка которого позволяет определить вероятностные (обеспеченные) значения испаряемости, т.е. испаряемость в годы различной увлажненности: влажный год – 5% обеспеченности, средневлажный год – 25, средний год – 50, среднесухой год – 75, сухой год – 95% обеспеченности.

2.1.2. Коэффициент природного увлажнения Ку и агроклиматическое районирование территории

Районирование испаряемости по природным зонам производится с использованием соотношения приходно-расходных частей водного и теплового балансов территории в современном ее физи-

ко-географическом облике. Этот показатель, названный коэффициентом природного увлажнения *Ку*, отвечает принципам общего физико-географического и специализированного (прикладного) районирования.

Для объективной оценки тепло-, влагообеспеченности территории рекомендован метод, согласно которому тепло-, влагообеспеченность определяется по зависимости:

$$Ку = \frac{W_a + P}{E},$$

где *Ку* – коэффициент природного увлажнения за период с $t \geq 5°C$;

W_a – активные влагозапасы в метровом слое почвы на начало расчетного периода (дата перехода температуры воздуха через +5°С), мм;

P – атмосферные осадки за расчетный период, мм;

E – испаряемость (потенциальная эвапотранспирация) за тот же период, мм.

Продолжительность расчетного периода в уравнении принята с учетом того, что в его пределы укладываются вегетационные периоды всех сельскохозяйственных культур.

Активные влагозапасы W_a определяются по формуле

$$W_a = W_{нв}(\mu - \beta_o),$$

где $W_{нв}$ – влагозапасы в метровом слое почвы, соответствующие ее наименьшей влагоемкости (водоудерживающей способности) мм;

μ – коэффициент, характеризующий степень фактического насыщения почвенного слоя влагой на начало расчетного периода, в долях от $W_{нв}$;

β_o – коэффициент, соответствующий предполивному порогу влажности почвы (допустимый порог иссушения почвы), в долях от $W_{нв}$.

Наименьшая влагоемкость, или водоудерживающая способность конкретной почвы, зависит от ее механического состава и водно-физических свойств.

Коэффициент μ в зависимости от характера и количества атмосферных осадков за зимне-весенний период изменяется в пределах от 0,8 до 1 (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента μ в зависимости от конкретных условий

Природно-климатическая зона	Коэффициент μ для культур	
	многолетних	однолетних
1 – пустынная	0,86	0,86
2 – полупустынная	0,9	0,88
3 – сухостепная	0,93	0,91
4 – умеренно-сухая степь	0,96	0,94
5 – лесостепная	0,98	0,95
6 – лесная	1	0,96

Нижний порог для определения расчетных влагозапасов определяется по формуле

$$\beta_o = 0,5(\beta_{нв} + \beta_з),$$

где $\beta_{нв}$ – влажность почвы, соответствующая наименьшей влагоемкости, % от массы;

$\beta_з$ – влажность завядания, % от массы.

При отсутствии конкретных данных согласно методике ФГБНУ ВНИИ «Радуга» β_o можно принимать в долях от $\beta_{нв}$:

для песчаных и супесчаных почв – β_o = (0,50-0,65) $\beta_{нв}$;

для суглинистых почв – β_o = (0,65-0,75) $\beta_{нв}$;

для глинистых почв – β_o = (0,75-0,8) $\beta_{нв}$.

Как видно из формул, для расчета испаряемости (потенциальной эвапотранспирации) и коэффициента увлажнения *Ку* используются данные об осадках, температуре и влажности воздуха, скорости ветра, почвенных влагозапасах, т.е. производится многофакторная оценка расчетного параметра.

Коэффициент увлажнения *Ку* можно считать обобщающим показателем недостатка или избытка атмосферного увлажнения рассматриваемой территории, объективно отображающим как климатические, так и геоморфологические ее особенности.

Расчеты *Ку* произведены на основе базы исходных данных, включающей в себя метеорологические данные по репрезентативным метеостанциям за 40-60-летний ретроспективный период (с апреля по октябрь):

среднедекадная температура воздуха, °С;

относительная влажность воздуха, %;

среднедекадная скорость ветра, м/с;

сумма декадных атмосферных осадков, мм.

Сведения о механическом составе, водно-физических и химических свойствах почвы для метрового слоя и зоны аэрации берутся из справочной литературы.

Агроклиматическое районирование территории производится по коэффициенту увлажнения *Ку* картированием его среднего многолетнего значения.

Градации *Ку* и соответствующие им природные зоны:

Ку < 0,2 – пустынная зона;

Ку = 0,21-0,3 – полупустынная;

Ку = 0,31-0,4 – сухостепная;

Ку = 0,41-0,5 – умеренно сухая степная;

Ку = 0,51-0,8 – лесостепная;

Ку > 0,8 – лесная.

Между коэффициентом увлажнения *Ку* и испаряемостью *Е* устанавливаются уравнения связи.

Анализ пространственно-временных связей между испаряемостью *Е*, характеризующей энергетические ресурсы климата, и коэффициентом увлажнения *Ку*, характеризующим соотношение ресурсов тепла и влаги на территории, позволяет оценить приемы и методы ведения сельскохозяйственного производства вообще и орошаемого земледелия в частности.

2.1.3. Суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур

Суммарное водопотребление E_v – транспирация растений плюс испарение с поверхности почвы – является основным элементом расходной части водного баланса сельскохозяйственного поля и одним их основных параметров орошения.

По разработанной в ФГБНУ ВНИИ «Радуга» методике, суммарное водопотребление устанавливается на основе биоклиматической модели, включающей в себя испаряемость, биологические и микроклиматические коэффициенты, отражающие роль растений и погодных условий в расходовании влаги с орошаемых полей. Зависимость, по которой рекомендуется определять суммарное водопотребление, имеет вид:

$$E_v = E \cdot K_б \cdot K_О,$$

где E_v – суммарное водопотребление, мм;

$K_б$ – биологический коэффициент, характеризующий роль растений в расходовании влаги сельскохозяйственным полем;

$K_О$ – микроклиматический коэффициент, учитывающий изменение микроклимата сельскохозяйственного поля под влиянием орошения;

E – испаряемость (потенциальная эвапотранспирация), мм.

Микроклиматический коэффициент *Ко*, отражающий возможное изменение микроклимата на сельскохозяйственном поле под влиянием орошения (в результате снижения температуры воздуха и скорости ветра, повышения влажности воздуха в приземном слое атмосферы), количественно зависит от размера орошаемой площади и коэффициента природного увлажнения (тепло-, влагообеспеченности) *Ку*.

Биологический коэффициент $K_б$ представляет собой отношение фактического водопотребления (суммарного испарения воды сельскохозяйственным полем) к испаряемости. Коэффициент $K_б$ изменяется территориально (по физико-географическим зонам), т.е. в одной и той же фазе развития культуры $K_б$ в разных зонах может количественно различаться на 10-20%. Кроме того, биологический коэффициент может меняться в реальном времени, т.е. в разные по увлажнению годы в течение вегетации культуры пофазные коэффициенты могут быть различными.

Значения $K_б$ показаны на рис. 1 на примере лесостепной зоны Российской Федерации.

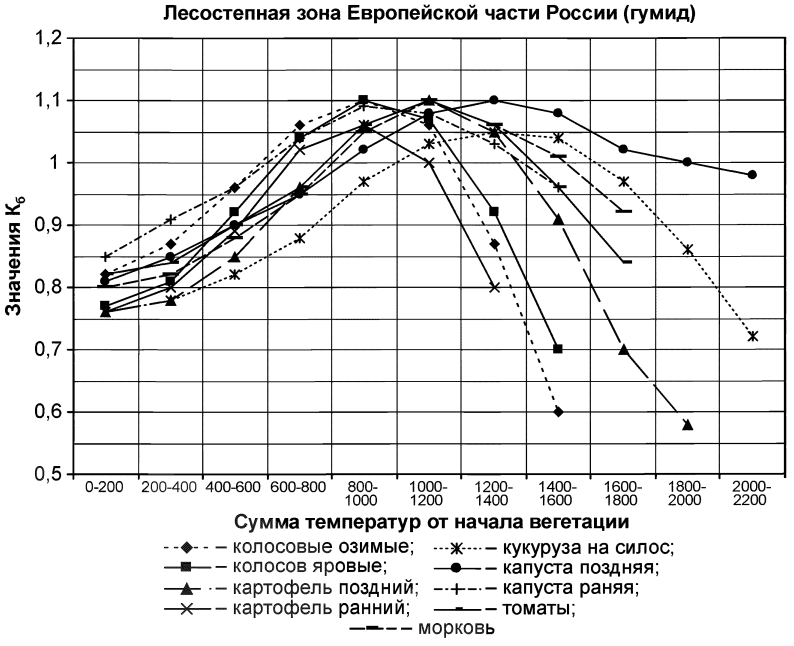


Рис. 1. Средние многолетние коэффициенты $K_б$ для основных сельскохозяйственных культур

При расчетах суммарного водопотребления в конкретные годы, отличающиеся по погодно-климатическим условиям от средних многолетних значений, используется так называемый текущий биологический коэффициент $K_{бi}$, который определяется по зависимости:

$$K_{бi} = K_{бо}(0,21\frac{E_o}{E_i} + 0,79),$$

где $K_{бо}$ – средний многолетний биологический коэффициент для расчетного периода (декады);

E_o – средняя многолетняя испаряемость за расчетную декаду, мм;

E_i – фактическая испаряемость за тот же период в реальном году, мм.

В принятой расчетной модели изменения биологических коэффициентов на протяжении вегетационного периода приурочено к накопительной (суммарной) кривой температуры воздуха, т.е. к кривой Σt°С через каждые 100 или 200°С. Такая градация $K_б$ вполне

достаточна для учета роли растений в расходовании воды сельскохозяйственным полем.

Для исключения влияния организационно-хозяйственных условий все показатели привязаны к температуре воздуха, обусловливающей сроки и продолжительность вегетации, темпы роста и развития растений. За начало периода водопотребления принято время посева или возобновления вегетации, за конец – следующие фазы:

для яровой пшеницы – восковая спелость 1450°С;

кукурузы на силос – сумма температур 1950°С;

люцерны прошлых лет – окончание вегетации;

картофеля позднего – увядание ботвы;

капусты поздней – съемная спелость.

Для районирования суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур по территории и его картирования используются пространственно-временные связи с компонентами природной среды, а также линейное интерполирование значений с последующей корректировкой положения изолиний E_v с физико-географическими особенностями территории.

Уравнения связи между суммарным водопотреблением E_v и коэффициентом увлажнения *Ку* могут быть использованы для определения суммарного водопотребления в любой выбранной точке территории в разные по увлажненности (обеспеченности) годы.

Многолетние ряды суммарного водопотребления для рассматриваемых культур статистически обрабатываются, в результате устанавливаются статистические характеристики: точность опыта (точность расчетных значений), коэффициент вариации и др.

Достоверность и достаточность исходных данных для расчета суммарного водопотребления и установления вероятностных (обеспеченных) его значений подтверждается значениями средней относительной ошибки коэффициента вариации C_v.

2.1.4. Оросительные нормы (дефициты водопотребления)

Водопотребление растений при недостатке влагообеспеченности отличается от оптимального, обусловливающего продуктивность сельскохозяйственных земель. Разница между оптимальным водопотреблением растений и водопотреблением при недостатке водообеспечения создает дефицит водопотребления, в сумме за вегетацию численно равный оросительной норме (рис. 2).

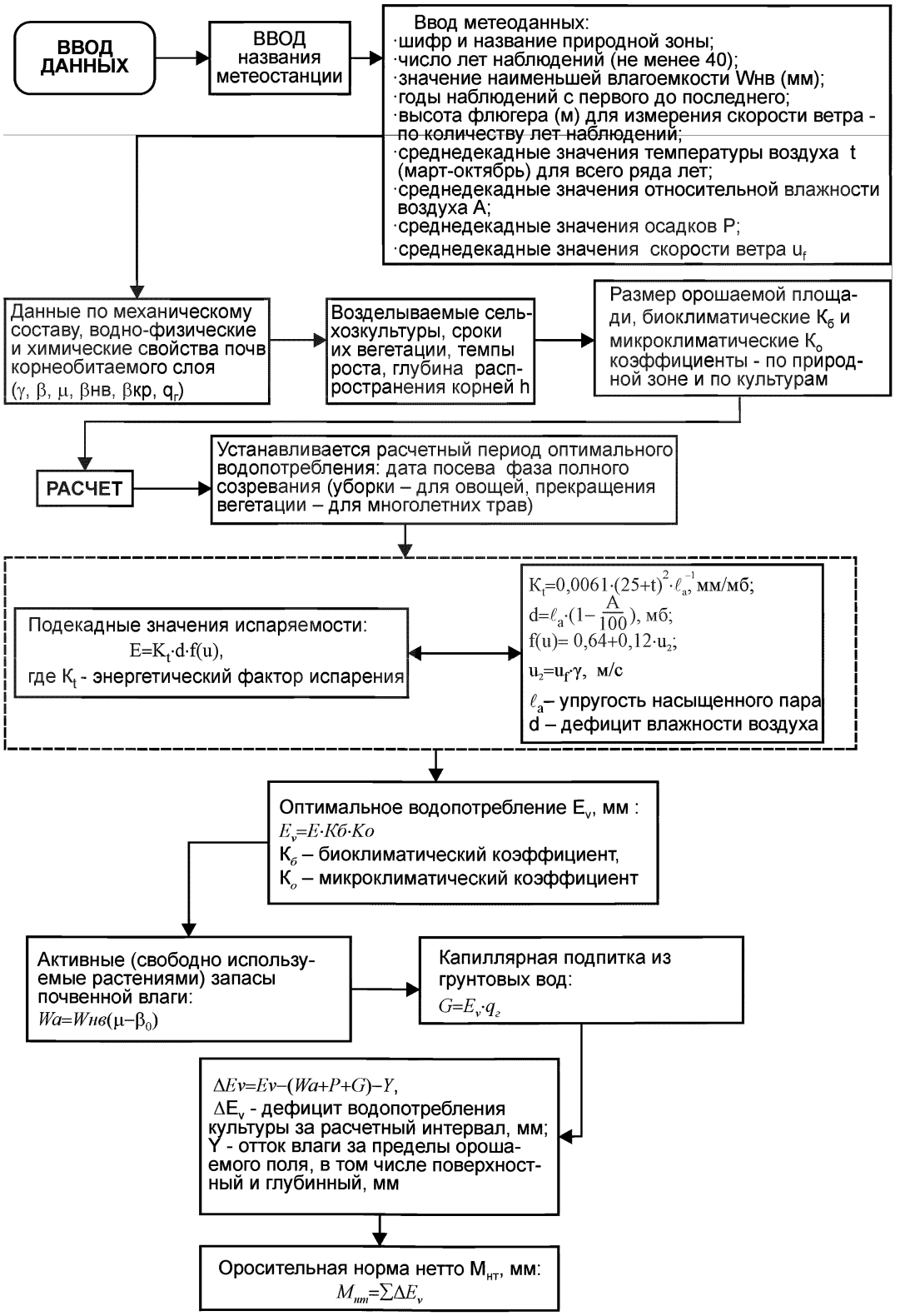


Рис. 2. Расчет оросительных норм по методике ВНИИ «Радуга»

Дефицит водопотребления (оросительная норма) за вегетационный период культуры рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$\Delta E_v = M_{нт} = \sum_{i=1}^{n} \Delta e_{vi},$$

где ΔE_v – суммарный за вегетацию дефицит водопотребления культуры, мм (м³/га);

$M_{нт}$ – оросительная норма нетто, мм (м³/га);

Δe_{vi} – дефицит водопотребления за выбранный расчетный период (месяц, декада).

Декадный дефицит водопотребления $\Delta e_{vд}$ определяется по уравнению водного баланса:

$$\Delta e_{vд} = E_{vд} - (P + W_a + G),$$

где $E_{vд}$ – оптимальное суммарное водопотребление за декаду, мм;

P – сумма атмосферных осадков за декаду, мм;

W_a – активные запасы влаги в расчетном слое почвы на начало декады, мм;

G – капиллярное подпитывание из грунтовых вод при близком их залегании, мм.

Сумма атмосферных осадков берется из стационарных метеорологических наблюдений по репрезентативным метеостанциям.

Расчет активных влагозапасов почвы W_a на начало декады показан в разделе определения коэффициента увлажнения *Ку*.

Использование грунтовых вод при близком их залегании (G) определяется по зависимости:

$$G = E_v \cdot g_г,$$

где E_v – суммарное водопотребление за декаду, мм;

$g_г$ – коэффициент капиллярного подпитывания в долях от E_v, зависящий от глубины залегания грунтовых вод, механического состава почв, толщины слоя аэрации и глубины распространения корневой системы растений.

При отсутствии экспериментальных данных о динамике грунтовых вод на объекте орошения рекомендуются данные табл. 3, полученные на основе обобщения и анализа отечественного и зарубежного опыта.

Таблица 3

Зависимость коэффициента $g_г$ от глубины залегания грунтовых вод, почв и агрофона

Глубина залегания грунтовых вод Нг, м	Легкие по механическому составу почвы				Тяжелые по механическому составу почвы			
	Агрофон							
	без растительного покрова	глубина корневой системы, $h_к$, м			без растительного покрова	глубина корневой системы, $h_к$, м		
		до 0,6	до 1	более 1		до 0,6	до 1	более 1
0,5	0,45	0,85	1,0	1,0	0,55	0,75	0,95	1,0
1,0	0,15	0,40	0,55	0,90	0,25	0,35	0,50	0,95
1,5	-	0,15	0,25	0,55	0,05	0,20	0,30	0,65
2,0	-	-	0,10	0,30	-	0,05	0,15	0,40
2,5	-	-	-	0,15	-	-	0,05	0,25
3,0	-	-	-	0,05	-	-	-	0,1

Для построения кривой обеспеченности (вероятности) оросительных норм рекомендуется использовать метод статистических испытаний, в соответствии с которым охватываются максимально возможные вариации естественных (эмпирических) рядов природных факторов. Для построения теоретической кривой распределения подбирается модель, соответствующая конкретным условиям. Устанавливаются связи оросительных норм с *Ку* в годы различной увлажненности (обеспеченности).

Пространственно-временная изменчивость оросительных норм (дефицитов водопотребления) отображается на картах изолиний их средней многолетней величины.

Расчетные значения оросительных норм рекомендуются при разработке проектных и эксплуатационных режимов орошения.

Статистическая обработка многолетних рядов оросительных норм показывает, что коэффициент их изменчивости *Cv* выше, чем для рядов суммарного водопотребления и испаряемости, и изменяется от 0,3-0,45 в степной зоне до 0,55-1 – в лесостепной и лесной. Высокие *Cv* свидетельствуют о значительных колебаниях величины оросительных норм в многолетнем периоде и необходимости их учета при проектировании систем орошения, реконструкции и экс-

плуатации существующих оросительных систем. Расчеты относительной среднеквадратической ошибки коэффициента вариации *Cv* показывают, что при рядах длительностью 40-60 лет и более ошибка *Cv* находится в пределах допустимой – 11-15%. При меньшей длине ряда, например 35 лет, ошибка *Cv* выходит за пределы допустимой (до 20%).

По установленным уравнениям связи оросительных норм с *Ку* рекомендуется расчет оросительной нормы для любого выбранного в регионе объекта и любого по влажности (обеспеченности) года.

Хронологический ряд оросительных норм (сумм за сезон) ранжируется в возрастающем порядке, затем в ранжированном ряду производится усреднение декадных дефицитов водопотребления по скользящему графику за каждые 4 года, т.е. в каждой декаде определяется дефицит водопотребления средний за 1, 2, 3 и 4 год, затем за 2, 3, 4 и 5 годы, за 3, 4, 5 и 6 годы и т.д. по порядковым номерам сумм за сезон каждого года. По средним декадным за 4 года дефицитам водопотребления определяется сумма их за сезон, т.е. оросительная норма. По суммам за сезон устанавливается эмпирическая и теоретическая обеспеченность (вероятность) каждого члена ряда и выделяются значения заданной вероятности (5, 25, 50, 75, 85 и 95%) (рис. 3).

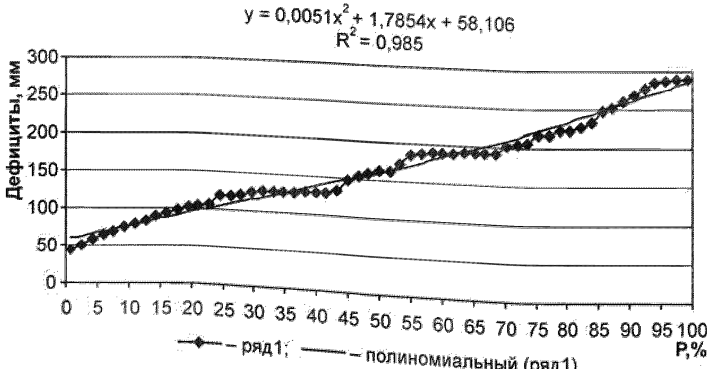


Рис. 3. Эмпирическое распределение дефицитов водопотребления озимой пшеницы при различной влагообеспеченности для территории Центрального федерального округа (ЦФО)

Распределение подекадных дефицитов водопотребления в год заданной расчетной обеспеченности оросительной нормы принимается как основа и рекомендуется для разработки поливных режимов.

Внутрисезонное распределение оросительных норм, установление которого обусловливается необходимостью выявления критических периодов водоснабжения растений за вегетацию, разработки поливных режимов, характеризуется большой изменчивостью по годам, особенно для районов неустойчивого увлажнения и вычисляется соответственно заданной обеспеченности оросительной нормы.

Полученные варианты внутрисезонного распределения оросительных норм кормовых и овощных культур для средних и сухих лет (50, 75 и 95% обеспеченности) по природным зонам Центрального федерального округа приведены в табл. 4.

Таблица 4

Внутрисезонное распределение оросительной нормы на примере основных культур ЦФО (Центрально-Черноземный район), %

Природная зона	Расчетный год	Вегетационный период					
		V	VI	VII	VIII	IX	IV-IX
Лесостепная зона (Ку = 0,51-0,8)	*Люцерна на сено*						
	Средний	7	30	27	22	14	100
	Среднесухой	10	28	26	22	14	100
	Сухой	12	28	26	21	13	100
	Капуста поздняя						
	Средний	12	34	31	19	4	100
	Среднесухой	15	33	29	19	4	100
	Сухой	15	32	29	19	5	100
	Зерновые колосовые						
	Средний	11	61	28	-	-	100
	Среднесухой	14	59	27	-	-	100
	Сухой	20	55	25	-	-	100

Продолжение табл. 4

Природная зона	Расчетный год	Вегетационный период					
		V	VI	VII	VIII	IX	IV-IX
Степная зона (Ку = 0,4-0,5)	*Люцерна на сено*						
	Средний	10	28	25	21	16	100
	Среднесухой	12	27	25	21	15	100
	Сухой	13	26	24	23	14	100
	Капуста поздняя						
	Средний	11	35	30	20	4	100
	Среднесухой	15	32	28	20	5	100
	Сухой	15	30	28	20	7	100
	Зерновые колосовые						
	Средний	14	59	27	-	-	100
	Среднесухой	15	58	27	-	-	100
	Сухой	21	54	25	-	-	100

Последующий расчет режимов орошения (поливных режимов) с использованием расчетных поливных норм рекомендуется на основе графоаналитического способа либо автоматизированным расчетом в среде Excel.

2.1.4. Поливная норма

Режим орошения сельскохозяйственных культур является основой рационального использования оросительной воды и сохранения качества и плодородия почвы в орошаемом земледелии. В общем виде сроки, нормы и частота поливов должны обеспечивать оптимальный для роста и развития растений водный режим в корнеобитаемом слое почвы. Разовая норма полива представляет собой объем воды, подаваемый на 1 га орошаемой площади за один полив и измеряется в $м^3$/га или мм. Зависит она от водно-физических свойств почвы, степени ее иссушения к моменту полива, состояния агрофона, рельефа орошаемой поверхности, а также способа и технологии полива. Именно поливная норма и режим ее реализации являются основными компонентами оперативного управления поливами.

Расчетная поливная норма, соответствующая водоудерживающей способности почвы, определяется по следующей зависимости:

$$m_{пр} = W_{нв} - W_o = 10 \cdot \gamma \cdot h_{пр} \cdot (\beta_{нв} - \beta_o),$$

где $W_{нв}$ – запасы влаги в расчетном слое почвы, соответствующие НВ (наименьшей влагоемкости), мм;

W_o – допустимые или фактические предполивные запасы в том же слое почвы, мм;

γ – объемная масса почвы в расчетном слое, т/м^3;

$h_{пр}$ – расчетная глубина промачивания почвы, м;

$\beta_{нв}$ – влажность почвы при НВ, % массы;

β_o – предполивная (допустимая) влажность почвы, % массы.

Расчетный слой $h_{пр}$ зависит от вида орошаемой культуры, состояния агрофона (фазы развития культуры и глубины распространения корневой системы), а также способа полива.

Наибольшую сложность при расчетах поливной нормы представляет определение допустимого (критического) порога иссушения почвы перед поливом. Критическую влажность почвы рекомендуется определять по формуле

$$\beta_o = 0{,}5 \cdot (\beta_{нв} + \beta_з),$$

где $\beta_з$ – влажность завядания, %.

Согласно справочной и нормативной литературе в качестве критической влажности рекомендуются ее следующие значения в долях от НВ:

для песчаных и супесчаных почв $\beta_o = (0{,}5\text{-}0{,}65)\ \beta_{нв}$;

для суглинистых почв $\beta_o = (0{,}65\text{-}0{,}75)\ \beta_{нв}$;

для глинистых почв $\beta_o = (0{,}75\text{-}0{,}85)\ \beta_{нв}$.

Для определения предполивных влагозапасов Vo (в долях от $W_{нв}$) применительно к тому или иному типу почвы (при известном значении $W_{нв}$) для метрового слоя нами рекомендуется использование следующего уравнения:

$$Vo = 0{,}36 + 1{,}48 \cdot 10^{(-3)} \cdot W_{нв} - 9{,}52 \cdot 10^{(-7)} \cdot W_{нв}^2.$$

При поливе дождеванием предельная поливная норма зависит не только от водоудерживающей способности почвы в диапазоне от W_o до $W_{нв}$, но главным образом от ее впитывающей способности с учетом рельефа и уклонов поверхности орошаемого поля, агрофона, интенсивности и структуры дождя. При этом реализуемая

поливная норма не должна превышать предельную (эрозионно допустимую) норму, которая может быть установлена по зависимости:

$$m_д = \frac{K_v}{\sqrt{P_0} \cdot e^{0,5 \cdot dk}},$$

где $m_д$ – достоковая поливная норма, мм;

K_v – показатель свободного безнапорного впитывания воды в почву, мм;

ρ_0 – средняя интенсивность дождя, свойственная данной дождевальной машине (установке), мм/мин;

dk – средний диаметр капель дождевого облака, мм;

e – основание натурального логарифма, равное 2,75.

Согласно Н.С. Ерхову для легкосуглинистых и супесчаных почв показатель K_v составляет 61-90 мм, для среднесуглинистых – 31-60, для тяжелосуглинистых – 21-30 мм.

Знаменатель в формуле представляет собой энергетическую характеристику дождя $S = \sqrt{\rho_o} \cdot e^{0,5 \cdot dk}$, отображающую технико-эксплуатационные параметры конкретной дождевальной машины или установки (интенсивность и структуру дождя).

Достоковая поливная норма для различных типов почвы и параметров дождя (ρ_o и d_k) приведена в табл. 5.

Таблица 5

Достоковая (эрозионнодопустимая) поливная норма ($m_д$, мм) для различных по водопроницаемости почв и энергетических параметров дождя

Средний диаметр капель дождя dk, мм	Интенсивность дождя ρ_0, мм/мин									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Почвы слабой водопроницаемости (K_v = 30 мм)										
1,0	58	41	33	29	26	23	22	20	19	18
1,5	45	32	26	22	20	18	17	16	15	14
2,0	35	25	20	17	16	14	13	12	12	11
2,5	27	19	16	14	12	11	10	10	9	9
3,0	20	15	12	10	9	8	7	7	6	6

Продолжение табл. 5

Средний диаметр капель дождя *dк*, мм	Интенсивность дождя ρ_0, мм/мин									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Почвы средней водопроницаемости (K_v = 60 мм)										
1,0	145	81	66	58	51	47	43	41	38	36
1,5	90	63	52	45	40	37	34	32	30	29
2,0	70	49	40	35	31	28	26	25	23	22
2,5	55	39	31	28	25	22	21	19	18	17
3,0	44	31	25	21	19	17	16	15	14	13
Почвы сильной водопроницаемости (K_v = 90 мм)										
1,0	172	122	100	86	77	70	65	61	58	55
1,5	135	95	78	67	60	55	51	47	45	43
2,0	104	74	64	52	47	43	40	37	35	33
2,5	81	58	47	41	37	33	30	29	28	26
3,0	65	45	36	32	32	27	24	22	21	20

Приведенные в табл. 6 достоковые поливные нормы являются ориентировочными, усредненными. Применительно к конкретным почвенно-рельефным условиям они должны корректироваться с учетом уклона поверхности орошаемого поля, фазы развития орошаемой культуры и состояния агрофона.

Таблица 6

Экологически безопасные (технологические) поливные нормы для различных культур и типов почв для условий ЦФО

Водопроницаемость почвы Kv	Зерновые колосовые		Люцерна (на сено)		Капуста поздняя	
	всходы – кущение	колошение – восковая спелость	начало отрастания	бутонизация – цветение	посадка рассады	образование кочана
Лесная зона Ку >0,8						
Средняя (0,31-0,6)	200-300	300-400	300-400	400-450	200-300	250-300
Повышенная (0,61-0,9)	200-350	400-450	400-500	450-500	200-300	300-350
Слабая (< 0,3)	200-300	300-350	250-350	350-400	150-200	200-300

Продолжение табл. 6

Водопроницаемость почвы, Кv	Зерновые колосовые		Люцерна (на сено)		Капуста поздняя	
	всходы – кущение	колошение – восковая спелость	начало отрастания	бутонизация – цветение	посадка рассады	образование кочана
Лесостепная зона Ку =0,51-0,8						
Средняя (0,31-0,6)	250-300	350-400	300-400	400-500	200-300	250-300
Повышенная (0,61-0,9)	300-400	400-500	400-500	500-600	250-350	350-400
Слабая (< 0,3)	200-250	300-350	250-300	300-400	150-200	200-300
Степная зона < 0,5						
Средняя (0,31-0,6)	300-350	350-450	350-400	400-500	200-300	300-400
Повышенная (0,61-0,9)	350-400	400-500	400-500	500-600	200-300	300-500
Слабая (< 0,3)	200-300	300-400	300-350	350-400	150-200	200-300

2.1.5. Графоаналитический расчет поливных режимов

Эксплуатационные графики полива строятся для севооборотных культур и наличного парка дождевальной техники с учетом ее размещения на полях. Составлению графиков предшествует разработка плановых режимов орошения на год ожидания, основным параметром которых является оросительная норма и ее внутрисезонное распределение.

Параметры и режимы орошения являются основой рационального использования оросительной воды и сохранения качества и плодородия почв. В общем виде сроки, нормы и частота поливов должны обеспечивать оптимальный для роста и развития растений водный режим в корнеобитаемом слое почвы.

Поливные режимы сельскохозяйственных культур для конкретных почвенно-климатических условий устанавливаются как экспериментально, так и с помощью расчетных методов.

Разрабатываемые графоаналитическим способом режимы орошения сельскохозяйственных культур являются в определенной мере статистическими (усредненными). Для условий конкретного объекта они могут корректироваться. При этом меньшие поливные

нормы следует давать в начальные фазы развития растений и во влажные годы, а бóльшие – в критические фазы развития культур и засушливые годы с устойчивым дефицитом почвенной влаги.

Во всех случаях максимально возможное приближение реализуемой поливной нормы к расчетной (технологической) должно обеспечиваться путем оптимизации технологических схем полива.

Пример разработанных графоаналитическим методом режимов орошения для люцерны на сено применительно к почвенно-климатическим условиям ЦФО для лет с различной влагообеспеченностью приведен в табл. 7 и на рис. 4.

Таблица 7

Поливной режим люцерны на сено в разные по влажности годы (лесостепная зона)

Год	№ полива	Поливная норма, $м^3/га$	Дата начала полива	Межполивной период, дни	Суточный расход, $м^3/га$	Оросительная норма, $м^3/га$
Сухой, Р 95%	1	300	18.05			
				8	37,5	
	2	400	26.05			
				11	36,4	
	3	400	08.06			
				12	33,3	
	4	400	21.06			
				11	36,4	
	5	500	03.07			
				15	33,3	
	6	500	19.07			
				18	27,8	
	7	500	07.08			
				18	27,8	
	8	500	26.08			3500

Продолжение табл. 7

Год	№ полива	Поливная норма, м^3/га	Дата начала полива	Межполивной период, дни	Суточный расход, м^3/га	Оросительная норма, м^3/га
Среднесухой, Р 75%	1	300	21.05			
				11	27,3	
	2	400	02.06			
				17	23,5	
	3	400	20.06			
				16	25,0	
	4	400	07.07			
				18	22,2	
	5	500	26.07			
				26	19,2	
	6	500	22.08			2500
Средний, Р 50%	1	300	24.05			
				18	16,7	
	2	400	12.06			
				24	16,7	
	3	400	07.07			
				30	13,3	
	4	500	07.08			1600

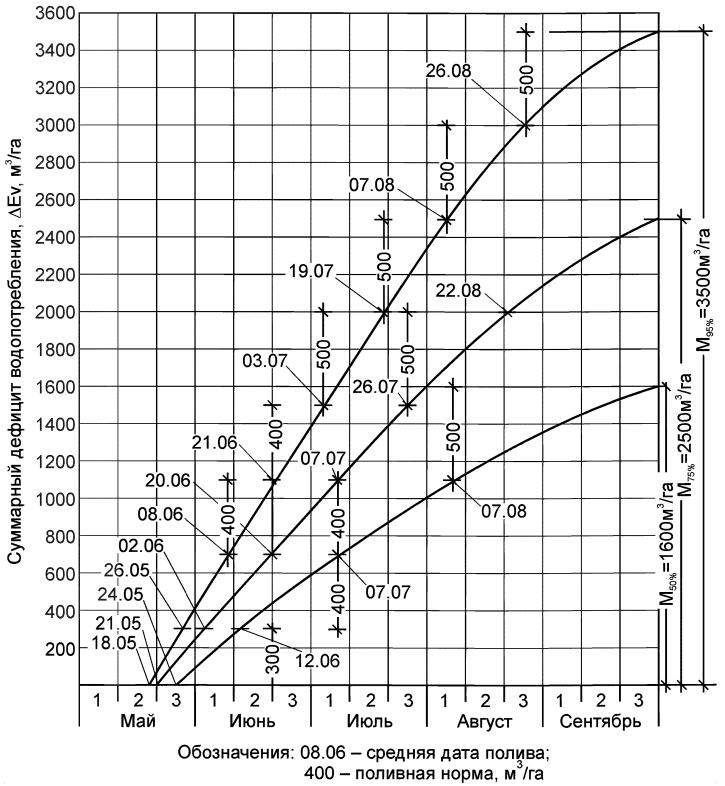


Рис. 4. Графоаналитический расчет режима орошения люцерны (лесостепная зона) для 50, 75, 95%-ной обеспеченности

2.2. Оперативное планирование режимов орошения

Многолетний опыт наблюдений ФГБНУ ВНИИ «Радуга» свидетельствует о том, что при любой форме инженерной службы эксплуатации внутрихозяйственных оросительных систем (НПО «Полив», УОС и др.) урожайность орошаемых культур зависит главным образом от того, в какой мере фактически реализованный на полях режим поливов соответствует оптимальным требованиям в воде возделываемых культур. Только при своевременных и качественных поливах достигается заданный уровень продуктивности орошаемых земель. В производственных условиях достижение это-

го уровня обеспечивается не только правильным планированием режимов орошения, но и их своевременной корректировкой с учетом складывающейся метеорологической обстановки, организационно-хозяйственных и других условий.

На основе анализа проводимых в этой области исследований и с учетом разработок ФГБНУ ВНИИ «Радуга» предлагается следующая схема решения (рис.5):

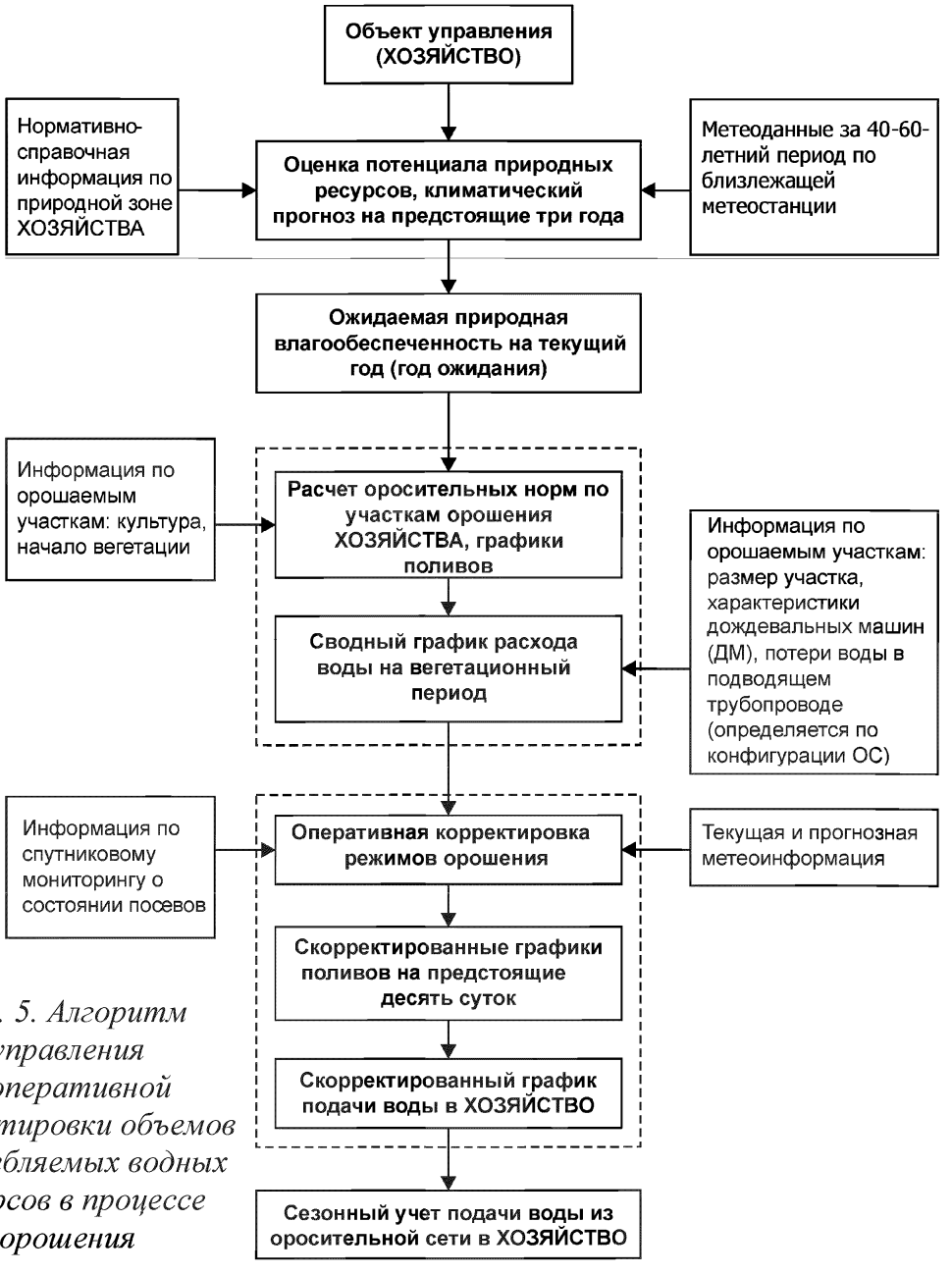


Рис. 5. Алгоритм управления и оперативной корректировки объемов потребляемых водных ресурсов в процессе орошения

• для объекта орошения (севооборота, хозяйства) на основе биоклиматического метода определения водопотребления разрабатываются режимы орошения для каждой севооборотной культуры не менее чем за 45-летний период наблюдений;

• на предстоящий год ожидания выбирается плановый режим орошения;

• на основе выбранного режима орошения и технико-эксплуатационных параметров поливных машин применительно к конкретным почвенно-рельефным условиям на предстоящий сезон разрабатываются эксплуатационные графики полива (графики режима работы поливальных машин);

• на стадии реализации эксплуатационных графиков полива с учетом изменения влажности почвы, метеорологической обстановки, организационно-хозяйственных и других условий производится прогнозирование сроков полива на ближайшие пять-десять суток и корректировка режимов орошения.

Основная задача на стадии реализации эксплуатационных режимов орошения состоит в установлении основных факторов, обусловливающих необходимость корректировки режима поливов, их учете, использовании технических средств сбора и оценки необходимой информации и принятии решения о необходимости и размерах корректировки.

Для оперативной корректировки эксплуатационных режимов орошения предлагается расчетный метод, основанный на оценке уравнения водного баланса применительно к почвенному слою активного влагообмена. Приходные статьи баланса (осадки, поливы) учитываются непосредственным измерением, а расходная часть уравнения (суммарное испарение с поля) рассчитывается по метеорологическим данным.

Суммарное испарение влаги с поля определяется биоклиматическим методом, который прошел многолетнюю проверку в производственных условиях.

Реализация эксплуатационных режимов орошения и их оптимизация (на основе оперативной корректировки) заключаются в следующем:

• корректировка и управление режимами поливов осуществляются по «требованию» поливных участков, обслуживаемых дождевальной машиной;

• на поливных участках измеряется влажность почвы в начале вегетационного периода до глубины трех метров (или до капиллярной каймы при близких грунтовых водах) и в последующем через каждые 1-1,5 месяца с целью контроля за изменением запасов влаги в почве расчетным методом;

• на каждом севооборотном участке систематически измеряются выпавшие атмосферные осадки, а также производятся контрольные замеры реализованных поливных норм и равномерность их распределения по площади и глубине;

• производится систематический сбор текущей и прогнозной метеорологической информации о температуре, влажности воздуха, скорости ветра и атмосферных осадках;

• производится сбор сведений о состоянии посевов, ходе агротехнических мероприятий, готовности поливной техники, оросительной сети и насосных станций;

• производится обработка полученной информации и выполняются водобалансовые расчеты на текущий и 5, 10-дневный прогнозные периоды;

• по полученным данным оценивается сложившаяся ситуация и принимается решение о целесообразности и размерах корректировки режима орошения сельскохозяйственных культур.

В настоящее время в ФГБНУ ВНИИ «Радуга» разработана программа оперативной корректировки эксплуатационных режимов орошения с учетом складывающихся и прогнозных погодных, организационно-хозяйственных, почвенно-климатических и экологических условий.

Предлагаемая разработка сократит материально-технические и энергетические затраты на 20-25%, оросительные нормы – на 10-20%, тем самым обеспечив экономию водных ресурсов на 20%. Прирост урожая повысится от 7 ц/га для многолетних трав до 14 ц/га для овощей.

3. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИГОДОВОГО И СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В МНОГОЛЕТНЕМ ПЕРИОДЕ

3.1. Результаты исследований и прогноз изменения климата в многолетнем периоде

Прогнозы Межправительственной группы экспертов по изменениям климата свидетельствуют о том, что XXI век будет периодом беспрецедентно быстрых изменений климата, которые окажут существенное влияние на многие отрасли экономики и в первую очередь на сельское хозяйство.

Исследования основных особенностей климата за последние 10-15 лет показали, что этот период является самым теплым и влажным не только за 100, но и за 1000 лет. Анализ эмпирических климатических данных, проведенный в Институте водных проблем РАН, выявил статистически значимый тренд изменения разнообразных показателей климата, таких как даты вскрытия и замерзания наиболее крупных рек России, преждевременные сроки наступления весны, увеличение продолжительности вегетационного периода в северном полушарии и т.д.

В научной литературе отражены и другие аномалии, вызванные быстрыми темпами потепления и похолодания. Основные из них следующие:

- ускорение процессов аридизации климата, повторяемость засух;
- рост содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере;
- влияние наблюдаемого «взрывного» потепления на биоклиматический потенциал сельскохозяйственных территорий;
- снижение и вариабельность биопродуктивности агроэкосистем;
- снижение уровня плодородия почв, их деградация;
- снижение устойчивости развития агроэкосистем.

Согласно расчетам и прогнозам международной группы экспертов, в которую входят ученые России, повышение глобальной средней температуры воздуха за 1990-2100 годы может составить от 1,5 до 5,8°С. Такое потепление не имеет прецедентов за прошедшие 10 тыс. лет.

На весеннем 2008 г. совместном заседании Совета по проблемам экологии в АПК с участием бюро Отделения земледелия, бюро Отделения мелиорации, водного и лесного хозяйства Россельхозакадемии, ученых ФГБУ «ВНИИСХМ», ГНУ «Агрофизический институт Россельхозакадемии» (АФИ), Госкомгидромета, ФГБНУ ВНИИ «Радуга», Главной географической обсерватории (ГГО) и др., а также производственников АПК была признана важность проблемы потепления климата и влияния его на сельское хозяйство, а также необходимость разработки единой стратегии адаптации сельского хозяйства к глобальным климатическим изменениям с учетом сохранения почвенного плодородия, ресурсосбережения в условиях нарастающего техногенного загрязнения биосферы.

Намечены тематика исследований и современные методы их проведения. Для решения названной проблемы в системе «климат-почва-урожай» обоснована тема исследований, направленная на разработку научно-методических основ оценки трендов изменения климатических факторов, их влияния на биопродуктивность агроэкосистем во взаимосвязи с почвенными показателями и согласованием с производственными циклами, становление трендов изменения климатических показателей, включая интегральный показатель тепло-, влагообеспеченности *Ку*, а следовательно, температур воздуха (*t*°С), осадков (*Р*, мм), испаряемости (*Е*, мм). Расчет ведется по годам многолетнего ряда с использованием усовершенствованных расчетных моделей ФГБНУ ВНИИ «Радуга» и специальной компьютерной программы.

Для оперативной оценки влияния наблюдаемых изменений природной среды на сельское хозяйство требуется система нормативных характеристик. Актуальной при этом представляется задача создания системы мониторинга влияния изменений климата.

Так, в ГНУ АФИ систематизированы и обобщены теоретические и опытные данные, мониторинговые наблюдения, а также результаты работ других научных и производственных организаций.

Сформулированы основные задачи, на основе которых составляется комплексная программа исследований.

1. Изменения агроклимата приводят к изменению структуры посевных площадей, потенциала продуктивности агроэкосистем, к увеличению или уменьшению применения агрохимических средств, их пространственному перераспределению.

2. Парниковый эффект (изменение состава атмосферы) обусловлен тем, что в зависимости от способа и интенсивности сельскохозяйственного использования земель, уровня агротехники и регулирования уровня плодородия почв, по мере прогрева они становятся источником CO_2.

3. Зональная эффективность удобрений проявляется в том, что прибавки урожайности от внесенного количества удобрений убывают при продвижении от влажных районов к зонам засушливого климата. Климатический фактор оказывает более сильное влияние, чем почвенный.

4. Перераспределение агроклиматических ресурсов ведет к расширению ареалов возделывания культур, их сортов и гибридов, что в свою очередь потребует дополнительного использования минеральных удобрений.

5. В связи с динамичностью погодных условий меняются агротехнические и мелиоративные приемы. Так, во влажных районах северной части России в 6-17% случаев потребуется повышение влагообеспеченности посевов, а в 30-64% – теплообеспеченности; в полуувлажненной лесостепи в 38% – улучшение влагообеспеченности, а в 8% – уменьшение избыточного увлажнения; в полузасушливой степной зоне в 73% – накопление влаги; в засушливой степи в 93% необходима только влагообеспеченность.

Исследования комплекса проблем, вызванных глобальными изменениями климата, широко отражены в литературе. Большинство работ посвящено исследованиям и расчетам влияния потепления глобального климата на основные показатели системы «климат-почва-урожай».

Воздействие изменений природно-климатических факторов обусловливает нелинейность развития сельского хозяйства при значительных экономических затратах. Снижение уровня обеспеченности растений теплом и влагой сопровождается корректировкой сроков посева культур, сдвигом фаз развития растений, сроков

проведения агротехнических мероприятий с соответствующим изменением потребности в орошении и параметров поливных режимов.

Как показывает практика, на основе синхронизации циклов земледелия с биоклиматическими природными циклами достигается устойчивость производства в сельском хозяйстве, стабильное его развитие и динамическое равновесие. Управляющим фактором признана мелиорация, экологическая и экономическая эффективность которой определяется ее адекватностью циклически изменяющимся природно-климатическим ситуациям, рациональному уровню плодородия почв и потенциальной биологической продуктивности.

В работе Ю.А. Израэля и О.Д. Сиротенко показано различное влияние этих двух процессов на примере кривой тренда урожайности яровых зерновых культур в Ставропольском крае для последних 110 лет. Межгодовая изменчивость погодных условий обусловливает четырех-, пятикратные колебания урожайности зерновых культур (от 0,5-1 до 2-2,5 т/га). Влияние изменений климата за последние десятилетия XX века характеризуется в том же регионе другими данными, а именно: повышением «климатообусловленной» урожайности зерновых на 30% по сравнению с аналогичным по продолжительности периодом в середине прошлого века, при этом обеспеченность урожаев в 2 т/га повысилась более чем в 5 раз.

В Известиях РАН [105] приведены следующие данные: с 1901 по 2000 г. средняя годовая глобальная температура приземного воздуха возросла на 0,6 ± 0,2°С, однако во времени этот процесс протекал неравномерно. Специалисты выделяют три периода аномальных изменений температуры: потепление 1910-1945 гг., небольшое относительное похолодание 1946-1975 гг. и наиболее интенсивное потепление, начавшееся в 1976 г. Самым теплым десятилетием были 1990-е годы, а самым теплым годом – 1998-й. При этом следует отметить, что потепление идет только в тропосфере, т. е. в пределах нескольких километров от поверхности земли, а в верхних слоях атмосферы температура снижается.

Очевидно, что изменения климата серьезно влияют на хозяйственную деятельность человека в самых разных областях, от сельского хозяйства до энергетики. Чего ждать от повышения среднегодовой температуры – засухи, пыльных бурь или, наоборот, наводнений и подтопления территории? Чтобы сделать прогноз воз-

можных последствий, нужно в первую очередь располагать точной и надежной информацией.

Одно из центральных мест современной мировой проблематики принадлежит проблеме глобального потепления климата и его влияния на все стороны жизни на Земле. Известно, что изменения климатических условий оказывают значительное влияние на сельское хозяйство. Исследования этого вопроса актуальны не только для будущего, но и для настоящего. Решение даже отдельных задач названной проблемы, таких как степень и направление изменений элементов водного, теплового и радиационного балансов на посевах сельскохозяйственных культур, особенно при орошении (или осушении), имеет большое научное и практическое значение [21].

В работе О.Д. Сиротенко [99] приведен вековой ход урожайности яровой пшеницы при нелимитированном уровне минерального питания, построенный для ряда регионов России, включая Московскую область, на основе имитационной системы климат-урожай СССР, которую автор использовал по проблематике оценки влияния колебаний и изменений климата за период 1891-1990 гг.

Анализируя полученные результаты, О.Д. Сиротенко выделил некоторые устойчивые закономерности, представленные им кривыми полиномов третьей степени. Важнейшая закономерность – наличие двух периодов роста климатически обусловленной урожайности – в 1910-1920 гг. и с 1991 г. Те же периоды благоприятного сочетания тепла и влаги выявлены по итогам приведенных исследований.

Дальнейшие исследования, дополняющие ряд фактическими данными (до 100 лет и более), позволят сформировать прогноз погодных условий, неблагоприятных для сельского хозяйства, разработать необходимые меры по смягчению их отрицательных воздействий.

3.2. Закономерности циклического характера динамики климатических факторов в многолетнем разрезе

Для научно-методического обоснования комплексной программы исследований, согласования решаемых задач с агротехническими особенностями сельскохозяйственного производства в со-

временных условиях и особенно в связи с постановкой задач по проблеме глобального потепления климата и последствий этого для сельского хозяйства очевидной стала потребность в новой компьютерной программе и математических подходах к расчетам и прогнозированию *Ку* и других показателей почвенно-климатических ресурсов.

Новые модели расчета и компьютерная программа позволяют устанавливать хронологические и вероятностные ряды любых показателей, их изменчивость, степень и направление трендов для набора метеостанций с наблюдениями за любой период. С использованием программы [33] и моделей стало возможным также прогнозирование циклов изменения климата и последствий этого для сельского хозяйства, согласование циклов многолетних колебаний климата с циклами сельскохозяйственного производства, что обеспечивает устойчивость земледелия. На основе прогноза разрабатываются предварительные адаптационные приемы, предотвращающие экологические кризисы, снижение плодородия почв и биопродуктивности земледельческих угодий.

На основе произведенных расчетов и их оценки по метеостанциям регионов России создана информационная и методическая база и получены предварительные результаты. Для решения поставленной задачи использован региональный подход. При этом учтена необходимость разделения понятий «изменчивость» и «изменения» климата, по-разному влияющих на урожайность.

Для предварительной и в определенной степени приближенной оценки изменений климатических показателей температур воздуха и осадков на территории ЦФО проведены расчеты по данным наблюдений за 60 лет на метеостанциях региона.

При построении графиков использовались среднемесячные температуры воздуха и суммы осадков за период с апреля по октябрь каждого года (1945-2003 гг.) по метеостанции Коломна. Применен интегральный метод динамического моделирования исходных показателей [106].

Современные методы выбора вероятностных оросительных норм какой-либо сельскохозяйственной культуры основаны на анализе ряда значений оросительных норм данной культуры, рассчитанных по имеющимся в этом районе рядам соответствующих метеорологических наблюдений [107]. При этом предполагается, что

наблюдаемые в прошлом метеорологические условия, определившие изменчивость оросительных норм по годам, являются однозначным прогнозом на будущее.

Между тем такой подход противоречит вероятностной природе оросительной нормы, так как метеорологическая ситуация за имеющийся период наблюдений представляет собой случайный процесс, который может уже никогда не повториться. Более того, анализ метеорологических наблюдений указывает на возможность появления новых, не отмеченных ранее, экстремальных явлений. Все это указывает на то, что в целом изменчивость климата такова, что имеющийся период регулярных метеонаблюдений не позволяет вычислить устойчивые значения требуемых статистических характеристик.

Иными словами, ряд оросительных норм, вычисленных по имеющимся рядам метеонаблюдений, особенно в Нечерноземной зоне России, где изменчивость климата от года к году очень высока, недостаточно репрезентативен, т.е. не охватывает весь ряд или генеральную совокупность. Поэтому традиционный подход к моделированию случайных последовательностей способом статистических испытаний (методом Монте-Карло) не всегда обеспечивает желаемый результат, так как модельный ряд должен иметь те же статистические характеристики, что и исходная последовательность [108].

Применяемые методы построения аппроксимирующей кривой обеспеченности по Фостеру-Рыбкину на основе трехпараметрического гамма-распределения или по кривым распределения Пирсона III типа и их модификациям по Крицкому-Менкелю зачастую непригодны для адекватного описания эмпирического распределения, особенно экстраполяции в области больших значений оросительной нормы [109, 110].

Поиски путей повышения достоверности построения кривых обеспеченности в этих условиях привели к выводу о необходимости предварительной обработки эмпирических распределений с целью выявления основных закономерностей распределения оросительной нормы, как бы затушеванных случайными вариациями значений частностей оросительной нормы от одного интервала к другому. В основе этого вывода лежит предпосылка, что природа, действуя случайным образом, не может иметь предпочтительных

состояний, обусловливающих высокие значения частностей оросительных норм в одних интервалах и их низкие значения в соседних с ними интервалах. Поэтому на протяжении многих лет природа должна привести к сравнительно равномерному заполнению интервалов с плавным закономерным переходом значений частностей от одного интервала к другому.

Эта предпосылка и лежит в основе аппроксимирующей аналитической кривой, описывающей более или менее точно аппроксимируемое эмпирическое распределение [111].

Методика вычисления рядов Фурье

Пусть функция f(x) определена на отрезке [-l; l] и ее период – 2l. Тогда имеют место равенства:

$$f(x)=a_0/2+\sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n\cos\frac{\pi nx}{l}+b_n\sin\frac{\pi nx}{l}\right), \qquad (1ф)$$

$$a_n=(1/l)\int_{-l}^{l} f(x)\cos\frac{\pi nx}{l}dx \ (n=0,1,2,\ldots), \qquad (2ф)$$

$$b_n=(1/l)\int_{-l}^{l} f(x)\sin\frac{\pi nx}{l}dx \ (n=1,2,\ldots). \qquad (3ф)$$

Ряд (1ф) с коэффициентами, вычисляемыми по формулам (2ф), (3ф), называется рядом Фурье для функции f(x) с периодом T=2l.

Пусть теперь y=f(x) – непериодическая функция (например, f(x) – это среднее значение температуры или суммы осадков за период апрель-октябрь, x – в данном случае текущий год). Такая функция не может быть разложена в ряд Фурье непосредственно, однако, может быть представлена в виде ряда Фурье на любом конечном промежутке [a, b] (в нашем случае a и b – начальный и конечный годы рассматриваемого хронологического ряда). Для этого необходимо поместить начало координат в середину отрезка [a, b] и построить функцию $f_1(x)$ периода $T=2l=|b-a|$ такую, что $f_1(x)=f(x)$ при $-l \le x \le l$. Разлагаем теперь функцию $f_1(x)$ в ряд Фурье. Сумма этого ряда во всех точках отрезка [a, b] совпадает с заданной функцией f(x).

В рассматриваемом примере для приближенного вычисления функции f(x) достаточно рассчитать сумму первых членов ряда Фурье:

$$f(x)=a_0/2+a_1\cos(\pi x/l)+b_1\sin(\pi x/l)+a_2\cos(2\pi x/l)+b_2\sin(2\pi x/l),$$

где $a_0/2$ – среднее значение температуры или суммы осадков за период апрель-октябрь;

l – половина рассматриваемого периода $|b-a|$;

x (из-за переноса начала координат) соответствует текущему году – $|b-a|/2$ – начальный год.

Коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2 (табл. 8) вычислены по формулам (2ф), (3ф), в них интегралы заменены на конечные суммы, рассчитываемые на отрезке [a, b] (dx = Δx = 1 год).

Таблица 8

Коэффициенты, характеризующие ряд Фурье

Показатели	Коэффициенты				
	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2
Температура	25	-0,3	0,3	0,03	-0,16
Осадки	776,2	0,8	24	44,2	8,05
Коэффициент увлажнения	2,26	0,05	0,1	0,2	0,03

Тренд изменения климатических факторов, вычисленных с использованием рядов Фурье, для метеостанции Коломна представлен на рис. 6.

Анализ данных на основе построения сплайн-функций для прогноза

Расчетные модели для оценки цикличности природно-климатических ситуаций, их влияния на производственные циклы орошаемого земледелия, необходимы для прогнозирования на последующие годы ожидаемой усредненной динамики урожайности и других элементов производства с учетом результатов практического опыта и наблюдений, выбора адекватных мелиоративных воздействий для их синхронизации.

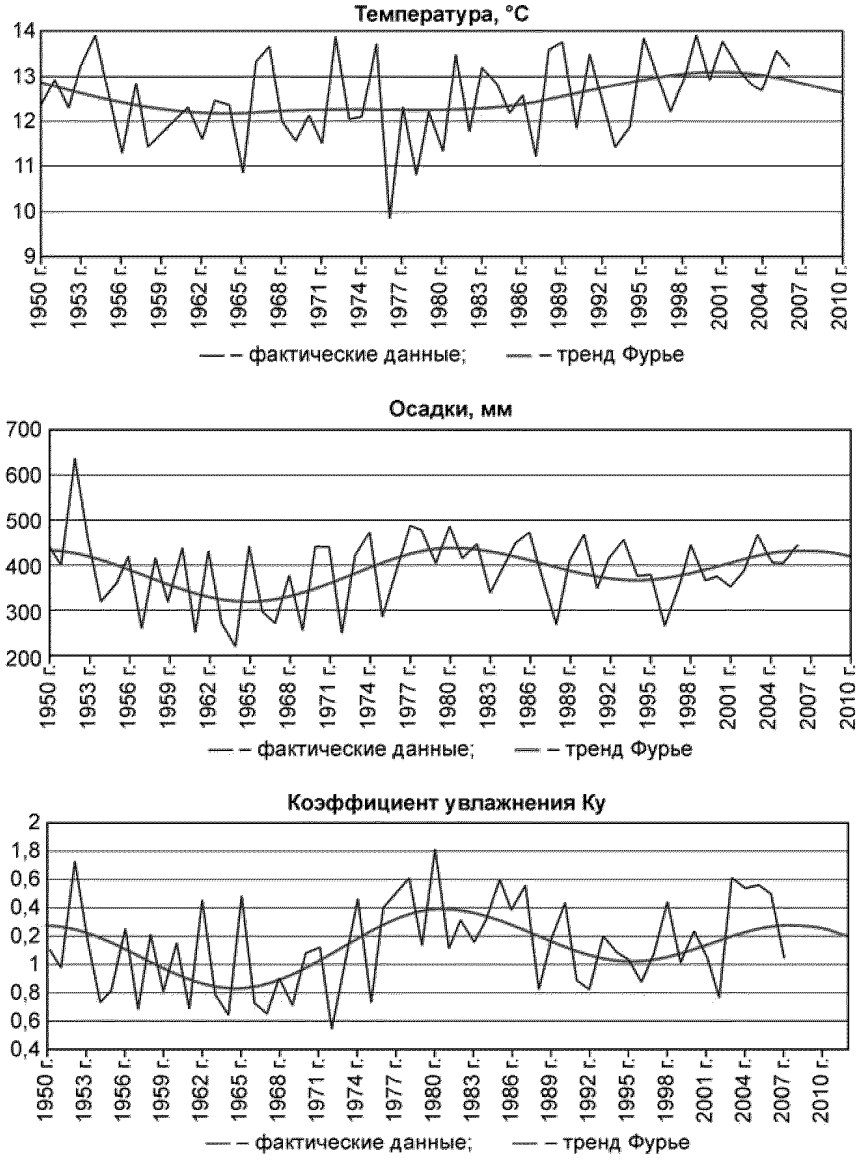


Рис. 6. Цикличность изменения климата по метеостанции Коломна с использованием тренда Фурье

В ФГБНУ ВНИИ «Радуга» за основу построения трендов с циклами колебаний в многолетнем периоде принята сплайн-функция.

Определяя параметры функций заданного вида (в данном случае сплайн-функции), получаем функцию, описывающую тренд исследуемого показателя, т.е. цикличность его изменений за многолетний период. При анализе временных рядов, например *Ку,* отмечается наличие зависимости последующего значения коэффициента от предыдущего. Чтобы выяснить эту зависимость, строится сплайн-функция приведенного вида ($Ку^{теор}$). Основываясь на данной функции, можно определить равномерность отклонений каждого показателя и решить задачу – как с помощью этой функции будет двигаться исследуемый элемент по временной оси в дальнейшем, в том числе за ее пределами.

Если отмеченная выше равномерность имеет место, то отклонения в обе стороны от сплайн-функции имеют одинаковую вероятность, что позволяет предполагать и прогнозировать тенденцию на основе полученных циклов.

Сплайн-функция (формула зависимости *Ку* от времени с помощью метода наименьших квадратов) имеет следующий вид:

$$F(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+a_{K1}cos(tw_1)+a_{K2}cos(tw_2)+a_{K3}cos(tw_3)+b_{K1}sin(tw_1)+ +b_{K2}sin(tw_2)+b_{K3}sin(tw_3).$$

Определяются:

• коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_{K1}, a_{K2}, a_{K3}, b_{K1}, b_{K2}, b_{K3} – методом наименьших квадратов (МНК);

• $w_{1,2,3}$ ($w = 2\pi/T$), для этого рассматриваются все $T_{1,2,3} \in [1,N]$ с шагом 0,25, где N – количество расчетных периодов (табл. 9);

• коэффициенты автокорреляции для оценки полученной сплайн-функции, показывающие наличие линейной зависимости между предыдущим и последующим отклонениями расчетных показателей от их фактических значений во временном ряду (табл. 10, 11);

• коэффициенты корреляции между суммами температур воздуха и осадков, показывающие наличие линейной связи метеоданных по температуре воздуха и осадков (рис. 7, 8);

• вариации *Ку,* например, среднее за многолетний период значение *Ку* (<*Ку*>);

• σ (среднеквадратичное отклонение), max (*Ку*), min (*Ку*), интервал, в котором располагается *Ку* с вероятностью не менее 95%.

Таблица 9

Коэффициенты сплайн-функции *Ку* по метеостанции Белгород

a_0	a_1	a_2	a_{k1}	b_{k1}	a_{k2}	b_{k2}	a_{k3}	b_{k3}
1,6021	-0,06764	0,001012	-15,442	1,2728	5,3422	2,2498	9,3585	-4,1223
Sigma^2	**T_1**	**w_1**	**T_2**	**w_2**	**T_3**	**w_3**		
0,03849	35	0,17952	32,5	0,19333	37	0,16982		

Таблица 10

Коэффициенты, характеризующие сплайн-функцию метеостанции Коломна

Показатели	Коэффициенты								
	a_0	a_1	a_2	a_{k1}	a_{k2}	a_{k3}	b_{k1}	b_{k2}	b_{k3}
Температура	12,540	-0,0398	0,0010	0,3488	-0,3070	0,1789	-0,1361	0,6981	0,0264
Осадки	462,67	-7,29	0,13	-29,70	11,52	10,02	9,12	4,58	-61,86
Коэффициент увлажнения	0,8868	0,013	-0,0001	0,094	-0,102	0,187	0,070	-0,003	0,087



Рис. 7. Тренд колебаний коэффициента природного увлажнения в многолетнем периоде по метеостанции Белгород (ЦФО)

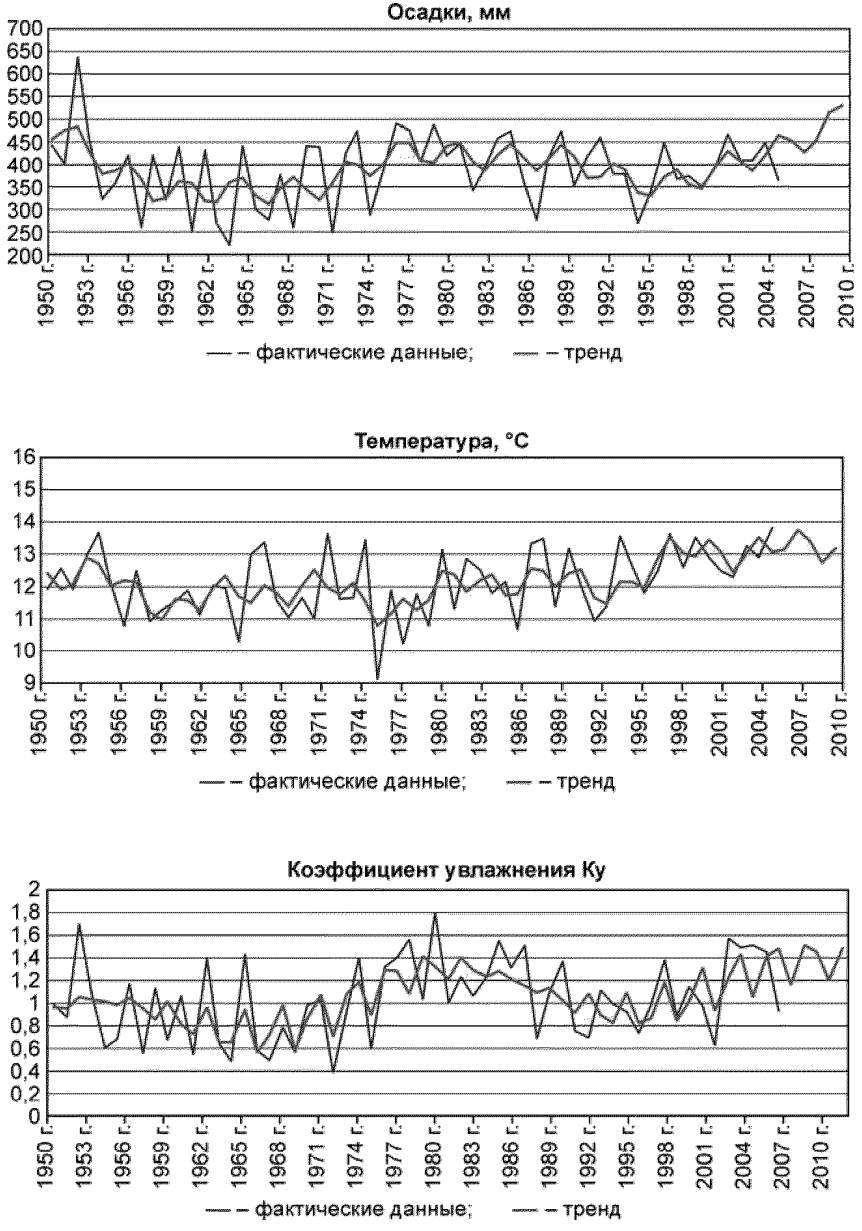


Рис. 8. Цикличность изменения климата по метеостанции Коломна с использованием сплайн-функции

Таблица 11

Продолжительность циклов колебаний метеорологических показателей

Показатели	Периоды		
	I	*II*	*III*
Температура, °С	3,5	9	16,5
Осадки, мм	4,25	13,25	40,75
Коэффициент увлажнения	1,5	2,75	28,75

Из полученных значений, например, $Ку^{теор}$ (сплайн $Ку^{теор}$) для периодов $T_{1,2,3}$ выбираем то, среднеквадратичное отклонение которого от истинных значений *Ку* минимально.

В данной работе применялись следующие статистические коэффициенты:

1) коэффициент корреляции, показывающий наличие линейной зависимости данных одного временного ряда от другого;

2) коэффициент автокорреляции, показывающий наличие линейной зависимости между предыдущим и последующим элементами во временном ряду.

Для осуществления расчетов по указанным методикам составлена расчетная компьютерная программа.

Полученные эмпирические зависимости характеризуют цикличность изменения показателей природных, тепловых ресурсов и влагообеспеченности с корреляционным отношением 0,72-0,83, что позволит повысить точность прогнозирования изменчивости метеорологических параметров в среднем на 15-20%.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях по прогнозированию ресурсного потенциала тепло-, влагообеспеченности, а также при разработке программы по оперативному управлению поливами соответственно климатическому циклу и определению экономико-экологической эффективности мелиоративных мероприятий.

4. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ДАННЫХ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОРОШЕНИЯ

4.1. Информация для планирования режимов орошения

Планирование проектных режимов орошения осуществляется для обоснования годовых потребностей в оросительной воде и пропускной способности оросительной сети, необходимых для достижения проектной урожайности сельскохозяйственных культур при заданной структуре посевов. План водопользования разрабатывается на основе анализа многолетней сезонной динамики накопления дефицитов водопотребления культур, отображающей соотношение между требующимся водопотреблением растений и зависящими от местных условий естественными приходными и расходными статьями водного баланса активного слоя почвы.

Характерной особенностью проектирования в зонах недостаточного и неустойчивого естественного водоснабжения растений является необходимость учета внутри- и межсезонных колебаний погодных условий.

Проектирование режимов орошения требует решения трех задач:

- определение многолетней динамики водопотребления сельскохозяйственных культур;
- установление вероятной сезонной динамики дефицита водопотребления культур и режимов орошения для любого заданного уровня обеспеченности по коэффициенту природного увлажнения территории;
- установление гидромодуля и расчетных расходов подачи воды на орошаемый участок на основе комплектования графиков поливов.

Управление процессом распределения оросительной воды на гидромелиоративных системах сопряжено со значительными трудностями, так как потребность в воде изменяется во времени и зависит от большого числа стохастических факторов.

Для оценки альтернативных вариантов необходимо учитывать физическую и физиологическую природу водопотребления сельскохозяйственных культур в рамках комплекса почвенно-климатических условий, технологические и технические аспекты процес-

са орошения, а также его экономические, социальные и экологические аспекты.

При управлении решаются следующие принципиальные задачи:

• оптимизация пространственно-временного распределения воды внутри орошаемого хозяйства или оросительной системы;

• технико-экономическое обоснование проектов по вовлечению и дополнительному освоению водных ресурсов;

• оптимизация распределения воды между потребителями в масштабах крупного региона, речного бассейна, экономических и природоохранных показателей, частью которых является определение водопотребления в орошаемом земледелии.

Повышение точности управления технологическими процессами в большой степени зависит от качества, точности, полноты, объективности и оперативности получения, обработки и реализации информации.

Очевидно, что реализуемое качество управления зависит не только от уровня обеспеченности потребителей средствами связи, необходимой информацией, но и от того, насколько точно модели отражают реальные процессы, происходящие на полях, динамику водного баланса посевов.

В конечном счете, проблема оптимизации технологического процесса орошения должна органически включать в себя агробиологическую, экологическую и социально-экономическую оценки.

Режим орошения и техника полива как категории, определяющие интенсивность и длительность возделывания оросительных мелиораций на агробиоценоз, тесно и неразрывно связаны друг с другом.

Для обеспечения экологически безопасного процесса орошения необходима технология полива с оптимальным сочетанием искусственных и естественных осадков и максимальным использованием последних. В результате сочетания увлажнения почвы естественными и искусственными осадками поступающая на поверхность почвы влага не полностью используется продуктивно: часть ее уходит на глубинную фильтрацию, часть на поверхностный сток. Кроме потерь поливной воды, это приводит к таким нежелательным последствиям, как смыв и уплотнение верхнего слоя почвы, миграция питательных элементов за пределы основного корнеобитаемого слоя почвы, подъем уровня грунтовых вод и др.

Достигаемая степень совершенства технологий орошения и технический уровень поливной техники могут и должны регламентироваться соответствующими группами индивидуальных и обобщённых показателей с учётом реальных ситуаций, возникающих для массивов и регионов с дефицитом природных ресурсов.

Перечень и классификация информации, необходимой для обеспечения оперативного планирования и управления процессом орошения, включающей в себя информационно-справочную, сезонную и оперативную информацию, а также параметры, используемые при расчетах, приведены в табл. 12, 13.

Таблица 12

Информация для обеспечения оперативного планирования режимов орошения

Вид информации	Содержание
Нормативно-справочная информация	- Сумма активных температур воздуха; - расчетный слой почвы по культурам и фазам развития; - биоклиматические коэффициенты водопотребления; - параметры уравнений для расчета суммарного испарения и динамики влагозапасов; - параметры для расчета влагообмена в зоне аэрации; - допустимая минерализация грунтовых вод; - параметры уравнений для расчета потерь оросительной воды, технического состояния оросительной сети и техники полива сельскохозяйственных культур; - зависимости «урожайность-влагообеспеченность»
Информация об объекте	- Стартовые запасы влаги в расчетном слое почвы; - запасы влаги при наименьшей влагоемкости; - критические запасы влаги в зависимости от наименьшей влагоемкости; - возделываемая культура; - данные о водно-физических и агрохимических свойствах почвы на начало вегетационного периода; - данные об используемой технике полива, наличии дренажной сети, их технические характеристики
Оперативная информация	- Дата начала расчетного оросительного периода (посев или возобновление вегетации); - текущие метеорологические показатели – температура, дефицит влажности воздуха, скорость ветра; - испарение с водной поверхности испарителя; - суточная сумма осадков; - глубина залегания грунтовых вод;

Продолжение табл. 12

Вид информации	Содержание
	- минерализация грунтовых вод; - показатели изменчивости биоклиматических коэффициентов; - фазы развития растений; - показатели изменчивости метеофакторов

Таблица 13

Номенклатура параметров, используемых при расчётах

Объект воздействия	Наименование показателей	Диапазон изменения	Точность наблюдения (расчётов) параметров
Приземный слой воздуха	Декадные осадки, мм	0 -80	±1
	Декадные температуры воздуха, t °С	0-50	±1
	Среднемноголетняя суточная испаряемость, мм/сут	0,1-9,9	±0,1
	Средняя скорость ветра, м/с	0-9,9	±0,3
	Среднемноголетний декадный модуль испаряемости, мм/°С	0,1-0,5	±0,005
Растение	Наименование и номер сельхозкультуры, га	1-90	-
	Биологические коэффициенты сельхозкультур, доли от единицы	0,50-1,20	±0,01
Почва	Объёмная масса, т/м^3	0,50-1,70	±0,01
	Влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости (НВ), % от массы или объёма	5,0-35,0	±0,1
	Предполивная влажность, % от НВ	60,0-90,0	±5
	Глубина залегания грунтовых вод, м	0,5-20	±0,1
Технические средства полива	Номер и модель дождевальной (поливной) машины	0-98	-

Методические основы оперативного управления поливами включают в себя ежедневную оценку почвенных влагозапасов в слое активного влагообмена, динамично связанных с видом и фазой развития сельскохозяйственной культуры.

4.2. База данных для расчета оросительных норм

Структура базы данных (БД) для расчета оросительных норм

• декадные метеоданные по температуре и влажности воздуха, скорости ветра и атмосферным осадкам (не менее чем за 30-40-летний период наблюдений);

• механический состав, водно-физические и химические свойства почв корнеобитаемого слоя и зоны аэрации;

• сельскохозяйственные культуры, сроки их вегетации, темпы роста, глубина распространения корней;

• биоклиматические и микроклиматические коэффициенты по природной зоне и культурам.

Метеоданные

Одним из элементов БД являются метеоданные по метеостанции, входящей в состав какого-либо федерального округа России. Метеостанция имеет название по географической принадлежности и оригинальную аббревиатуру, соответствующую имени файла, где хранятся метеорологические наблюдения за период 30-60 лет (с марта по октябрь).

Данные тарированные, достоверные, предоставлены государственными метеослужбами в разные годы.

Количество файлов БД соответствует количеству метеостанций (на 2011 г. – 195 метеостанций по различным регионам Российской Федерации).

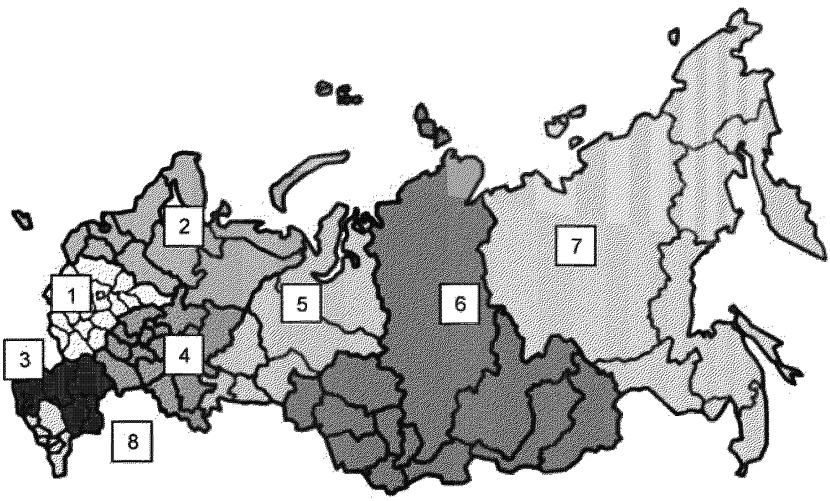
Структура информационной базы данных для расчета параметров орошения приведена на рис. 9.

С помощью БД может осуществляться расчет параметров режимов орошения для любого региона России, прогнозирование экологически безопасных поливных режимов с предварительным установлением внутрисезонного распределения оросительной нормы и размеров поливных норм в соответствии с динамикой корнеобразования.

Федеральные округа России и входящие в их состав субъекты закодированы для организации поисковой системы (рис. 10, табл. 14).



Рис. 9. Состав и структура информационной базы для расчета параметров орошения



1– Центральный ФО; 2– Северо-Западный ФО; 3– Южный ФО;
4– Приволжский ФО; 5– Уральский ФО; 6– Сибирский ФО;
7– Дальневосточный ФО; 8– Северо-Кавказский ФО

Рис. 10. Карта Российской Федерации с принятой в БД кодировкой федеральных округов

Таблица 14

Кодирование по субъектам Российской Федерации

Субъекты РФ	Внутренние коды
Центральный ФО (код 1)	
Белгородская область	1
Брянская область	2
Владимирская область	3
Воронежская область	4
Ивановская область	5
Калужская область	6
Костромская область	7
Курская область	8
Липецкая область	9
Московская область	10
Орловская область	11
Рязанская область	12

Продолжение табл. 14

Субъекты РФ	Внутренние коды
Тамбовская область	13
Тверская область	14
Тульская область	15
Ярославская область	16
Смоленская область	17
Северо-Западный ФО (код 2)	
Вологодская область	1
Ленинградская область	2
Новгородская область	3
Псковская область	4
Республика Коми	5
Республика Карелия	6
Архангельская область	7
Калининградская область	8
Мурманская область	9
Ненецкий АО	10
Южный ФО (код 3)	
Республика Адыгея	1
Республика Калмыкия	2
Краснодарский край	3
Астраханская область	4
Волгоградская область	5
Ростовская область	6
Приволжский ФО (код 4)	
Республика Башкортостан	1
Республика Марий-Эл	2
Республика Мордовия	3
Республика Татарстан	4
Удмуртская Республика	5
Чувашская Республика	6
Кировская область	7
Нижегородская область	8
Оренбургская область	9
Пензенская область	10
Пермская область	11
Самарская область	12

Продолжение табл. 14

Субъекты РФ	Внутренние коды
Саратовская область	13
Ульяновская область	14
Уральский ФО (код 5)	
Курганская область	1
Тюменская область	2
Челябинская область	3
Свердловская область	4
Ханты-Мансийский АО	5
Ямало-Ненецкий АО	6
Сибирский ФО (код 6)	
Республика Алтай	1
Республика Бурятия	2
Республика Тыва	3
Республика Хакасия	4
Алтайский край	5
Красноярский край	6
Иркутская область	7
Кемеровская область	8
Новосибирская область	9
Омская область	10
Томская область	11
Читинская область	12
Дальневосточный ФО (код 7)	
Республика Саха (Якутия)	1
Приморский край	2
Хабаровский край	3
Амурская область	4
Камчатский край	5
Магаданская область	6
Еврейская автономная область	7
Сахалинская область	8
Чукотский край	9
Северо-Кавказский ФО (код 8)	
Республика Дагестан	1
Кабардино-Балкарская Республика	2
Карачаево-Черкесская Республика	3

Продолжение табл. 14

Субъекты РФ	Внутренние коды
Республика Северная Осетия-Алания	4
Ставропольский край	5
Республика Ингушетия	6
Чеченская республика	7

Предлагаемое кодирование используется при поиске метеостанций для расчета определенного региона (рис. 11).

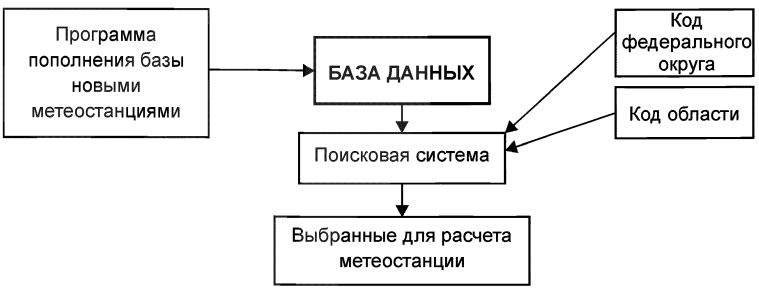


Рис. 11. Функциональная схема базы данных

Поисковая система организована в среде Excel.

Например, для выбора метеостанций, входящих в состав Новосибирской области, следует при поиске ввести код 6 для федерального округа и 9 – для области. Поисковая система отобразит названия находящихся в области метеостанций, аббревиатуру соответствующих им файлов с данными и интервал лет метеонаблюдений (табл. 15).

Таблица 15

Пример выбора метеостанций поисковой системы

№	Код федерального округа	Код области	Метеостанция	Аббревиатура	Год	
					начало	окончание
18	6	9	Барабинск	brb	1951	2004
46	6	9	Довольное	dow	1956	2004
71	6	9	Карасук	kar	1951	2004
82	6	9	Кочки	kki	1951	2004
90	6	9	Купино	kup	1951	2004
96	6	9	Легостаево	leg	1956	1984

Продолжение табл. 15

№	Код федерального округа	Код области	Метеостанция	Аббревиатура	Год	
					начало	окончание
115	6	9	Огурцово	ogu	1951	2004
131	6	9	Посевная	pos	1951	2004
147	6	9	Северное	sew	1951	1991
158	6	9	Сузун	suz	1964	2004
163	6	9	Татарск	tat	1951	2004
172	6	9	Ужаниха	uga	1951	2004
186	6	9	Чулым	chu	1951	2004

Описание файлов метеоданных

Файлы с данными организованы в системе MS DOS и идентифицируются аббревиатурой из трех латинских букв, каждому файлу соответствует одна метеостанция.

Файл содержит следующие сведения:

- полное название метеостанции;
- число лет наблюдений (30-60 лет);
- шифр и название природной зоны;
- значение наименьшей влагоемкости Wнв (мм);
- годы наблюдений (от первого до последнего);
- высота флюгера (м) для измерения скорости ветра (по количеству лет наблюдений);
- подекадные среднесуточные значения температуры (март-октябрь) для всего ряда лет, °С;
- подекадные среднесуточные значения относительной влажности воздуха, %;
- подекадные значения суммы осадков, мм;
- среднесуточные скорости ветра соответственно для всего временного периода, м/с.

Для использования файлов при расчете по усовершенствованной программе осуществляется перевод в новый формат: метеоинформация по каждой метеостанции, входящей в состав базы данных, разбивается на два файла: *.msd и *.msi, где * – это аббревиатура метеостанции. Общая структура и наполнение файлов базы данных представлены на рис. 12.



Рис. 12. Структура файлов данных метеоинформации

База метеоданных для использования представляется в формате таблиц в среде Excel. Таблица имеет унифицированную форму, позволяющую вести базу данных не только по среднедекадным значениям, но и по суточным, почасовым и в поминутном разрезе (при использовании цифровых метеостанций), что обеспечивает получение наиболее точной информации с объекта исследований.

Ввод метеоданных в заданном формате осуществляется с помощью программы Zap_data в среде Excel (Visual Basic) (рис. 13).

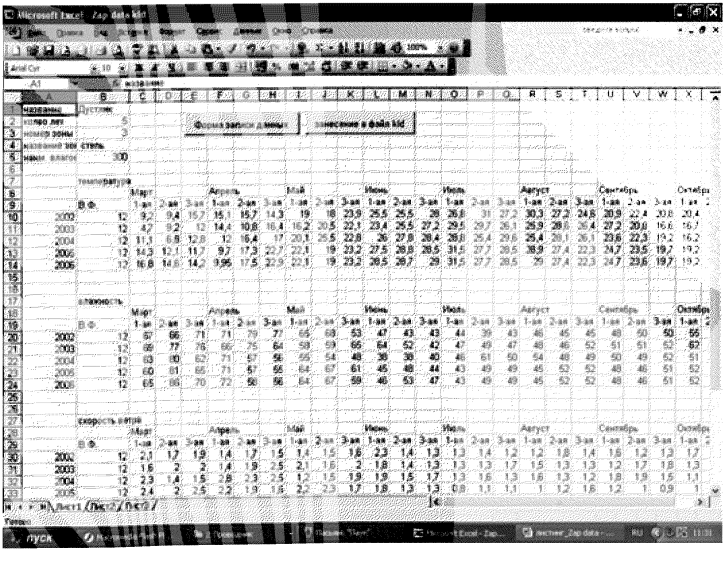


Рис. 13. Ввод метеоданных с помощью программы Zap_data

Для Европейской части России (BD OSN) культуры закодированы согласно табл. 16. Для Сибирского региона (BD URAL), где значения Кб отличаются, при кодировании культур к шифру прибавляется число 20. Например, пшеница озимая для Сибирского региона вводится под шифром 21, картофель поздний – 24 и т.д.

Таблица 16

Коды культур для Европейской части Российской Федерации

Наименование культуры	Код
Пшеница озимая	1
Пшеница яровая	2
Зернобобовые	3
Картофель поздний	4
Картофель ранний	5
Кукуруза на зерно	6
Кукуруза на силос	7
Кукуруза пожнивная	8
Свекла сахарная	9
Свекла кормовая	10
Свекла столовая	11
Люцерна подпокровная	12
Люцерна прошлых лет	13
Пастбище орошаемое	14
Травы однолетние (одноукосные)	15
Травосмеси многолетние (многоукосные)	16
Капуста поздняя	17
Капуста ранняя	18
Овощи (томаты, огурцы и т.д.)	19
Овощи (лук, морковь и т.д.)	20

Биоклиматические и микроклиматические коэффициенты по природной зоне и культурам для расчета выбираются из таблиц, построенных на основе базы данных, накопленной в ФГБНУ ВНИИ «Радуга» (табл. 17-20).

Таблица 17

Биоклиматические коэффициенты водопотребления сельскохозяйственных культур $K_б$ в зависимости от суммы среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации (BD OSN)

Культура	Расчетный (вегетационный) период		Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	начало	окончание	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
ЗОНА ПУСТЫНЬ (*Ку* < 0,20)																		
Колосовые озимые	6*	1400**	0,65	0,72	0,9	1,08	1,12	0,95	0,55	0,55	0,55	0,55	0	0	0	0	0	0
Колосовые яровые	6	1450	0,5	0,55	0,74	1,01	1,12	1,03	0,76	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
Картофель поздний	10	1850	0,5	0,54	0,62	0,76	0,96	1,1	1,12	1,01	0,74	0,52	0,52	0	0	0	0	0
Кукуруза на зерно	10	2300	0,5	0,52	0,6	0,73	0,88	1,02	1,1	1,1	1,02	0,84	0,6	0,4	0,4	0	0	0
Люцерна прошлых лет	6	8***	0,7	0,78	1	1,12	0,65	0,75	1	1,12	0,65	0,75	1	1,12	0,65	0,75	1	1,12
ЗОНА ПОЛУПУСТЫНЬ (*Ку* = 0,21- 0,30)																		
Колосовые озимые	6	1400	0,68	0,73	0,9	1,08	1,13	0,95	0,55	0,55	0,55	0,55	0	0	0	0	0	0
Колосовые яровые	6	1450	0,56	0,62	0,79	1,01	1,12	1,03	0,78	0,56	0,56	0,56	0,56	0	0	0	0	0
Картофель поздний	10	1850	0,5	0,54	0,62	0,76	0,96	1,1	1,12	1,01	0,74	0,52	0,52	0,52	0	0	0	0
Кукуруза на зерно	10	2300	0,51	0,54	0,62	0,72	0,85	1,02	1,11	1,12	1,04	0,84	0,63	0,63	0,63	0,63	0	0
Кукуруза на силос	10	1950	0,53	0,56	0,65	0,76	0,89	1,02	1,11	1,12	1,04	1,04	1,04	1,04	0	0	0	0

Продолжение табл. 17

Культура	Расчетный (вегетационный) период		Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	начало	окончание	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Кукуруза пожнивная	6	1300	0,5	0,54	0,6	0,71	0,87	0,99	1,08	1,1	1,08	0	0	0	0	0	0	0
Сахарная свекла	9	3000	0,56	0,62	0,67	0,74	0,82	0,92	1	1,08	1,13	1,12	1,08	1	0,9	0,77	0,77	0,77
Кормовая свекла	8	2000	0,5	0,54	0,62	0,76	0,89	1,07	1,1	1,05	0,9	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	0
Столовая свекла	10	2100	0,62	0,65	0,76	0,87	0,96	1,08	1,1	1,03	0,9	0,8	0,72	0	0	0	0	0
Люцерна подпокровная	8	1400	0,5	0,55	0,66	0,9	1,08	0,7	0,8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Люцерна прошлых лет	6	8	0,72	0,8	1	1,12	0,7	0,8	1	1,12	0,7	0,8	1	1,12	0,7	0,8	1	1,12
Пастбище орошаемое	6	8	0,76	0,9	1,07	0,76	0,9	1,06	0,76	0,9	1,06	0,76	0,9	1,06	0,76	0,9	1,06	0
Однолетние травы	9	2500	0,52	0,6	0,75	0,98	1,1	0,68	0,78	0,98	1,08	1,1	0,68	0,78	0,98	1,08	1,1	0
Капуста поздняя	14	2100	0,7	0,77	0,88	0,97	1,05	1,11	1,1	1,05	0,96	0,87	0,8	0,76	0	0	0	0
Овощи (томаты, огурцы)	12	2000	0,72	0,75	0,86	0,97	1,06	1,1	1,1	1,03	0,9	0,8	0,72	0	0	0	0	0
Овощи (лук, морковь)	0	0	0,72	0,75	0,86	0,97	1,06	1,1	1,1	1,03	0,9	0,8	0,72	0	0	0	0	0
ЗОНА СУХИХ СТЕПЕЙ (*Ку* = 0,31-0,40)																		
Колосовые озимые	6	1400	0,7	0,76	0,9	1,08	1,13	0,96	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Колосовые яровые	8	1450	0,63	0,69	0,8	1,01	1,11	1,05	0,8	0,56	0,56	0,56	0,56	0	0	0	0	0
Картофель поздний	10	1850	0,54	0,58	0,66	0,79	0,96	1,1	1,12	1,01	0,8	0,57	0,57	0,57	0,57	0	0	0

Кукуруза на зерно	10	2300	0,53	0,56	0,65	0,76	0,89	1,02	1,11	1,12	1,04	0,84	0,63	0,63	0,63	0,63	0	0
Кукуруза на силос	10	1950	0,53	0,56	0,65	0,76	0,89	1,02	1,1	1,11	1,03	1,03	1,03	1,03	0	0	0	0
Кукуруза пожнивная	6	1300	0,5	0,54	0,6	0,71	0,87	0,99	1,08	1,1	1,08	0	0	0	0	0	0	0
Сахарная свекла	10	2800	0,56	0,62	0,67	0,74	0,82	0,92	1	1,08	1,13	1,12	1,08	1	0,9	0,77	0,77	0,77
Кормовая свекла	8	2000	0,52	0,57	0,66	0,78	0,94	1,09	1,1	1,04	0,91	0,76	0,76	0,76	0,76	0	0	0
Столовая свекла	10	2100	0,62	0,65	0,75	0,87	0,96	1,1	1,1	1,03	0,9	0,8	0,72	0	0	0	0	0
Люцерна подпокровная	8	1350	0,5	0,55	0,66	0,9	1,08	0,71	0,8	1	1,1	0,71	0,8	0,96	0	0	0	0
Люцерна прошлых лет	6	8	0,75	0,83	1,01	1,12	0,71	0,8	1	1,12	0,71	0,8	1	1,12	0,71	0,8	1	0
Пастбище орошаемое	6	8	0,76	0,9	1,07	0,76	0,9	1,06	0,76	0,9	1,06	0,76	0,9	1,06	0,76	0,9	1,06	0
Однолетние травы	10	2400	0,57	0,63	0,78	0,98	1,11	0,68	0,78	0,98	1,08	1,1	0,66	0,78	0,98	0	0	0
Капуста поздняя	12	1800	0,7	0,77	0,88	0,97	1,05	1,11	1,1	1,05	0,96	0,87	0,8	0,76	0	0	0	0
Овощи (томаты, огурцы)	12	2000	0,72	0,75	0,86	0,97	1,06	1,1	1,1	1,03	0,9	0,8	0,72	0	0	0	0	0
Овощи (лук, морковь)	10	1900	0,7	0,73	0,84	0,94	1,04	1,08	1,08	1,08	1	0,88	0,76	0,7	0	0	0	0
ЗОНА УМЕРЕННЫХ СТЕПЕЙ (*Ку* = 0,41-0,50)																		
Колосовые озимые	6	1400	0,76	0,82	0,94	1,07	1,12	1	0,65	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Колосовые яровые	8	1450	0,68	0,72	0,83	1,01	1,11	1,03	0,86	0,63	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Картофель поздний	10	1850	0,61	0,65	0,72	0,84	1,01	1,1	1,12	1,02	0,82	0,6	0,6	0	0	0	0	0
Картофель ранний	8	1400	0,61	0,65	0,75	0,96	1,08	1,1	0,98	0,62	0,6	0	0	0	0	0	0	0
Кукуруза на зерно	10	2200	0,6	0,64	0,7	0,82	0,92	1,02	1,08	1,09	1,02	0,87	0,68	0,65	0,6	0	0	0
Кукуруза на силос	10	1950	0,6	0,64	0,7	0,82	0,92	1,02	1,08	1,09	1,02	0,87	0,85	0,85	0	0	0	0
Кукуруза пожнивная	6	1300	0,52	0,55	0,62	0,73	0,86	0,97	1,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 17

Культура	Расчетный (вегетационный) период		Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	начало	окончание	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Сахарная свекла	10	2600	0,62	0,66	0,72	0,78	0,85	0,94	1,02	1,09	1,14	1,14	1,09	1,02	0,91	0,8	0,66	0
Кормовая свекла	8	2000	0,6	0,65	0,73	0,86	1,01	1,09	1,1	1,01	0,85	0,66	0,65	0,6	0,6	0	0	0
Столовая свекла	10	1800	0,76	0,79	0,88	0,98	1,06	1,1	1,1	1,04	0,97	0,89	0,82	0	0	0	0	0
Люцерна подпокровная	8	1350	0,53	0,58	0,7	0,91	1,08	0,76	0,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Люцерна прошлых лет	6	8	0,79	0,85	1,02	1,12	0,77	0,84	1,01	1,11	0,77	0,84	1,01	1,1	0,77	0,84	0	0
Пастбище орошаемое	6	8	0,8	0,91	1,07	0,79	0,91	1,06	0,79	0,91	1,06	0,79	0,91	1,06	0,79	0,91	1,06	0
Однолетние травы	9	8	0,64	0,7	0,83	1	1,1	0,74	0,86	0,98	1,08	1,1	0,74	0,86	0,98	1,08	1,1	0,75
Многолетние травосмеси	9	8	0,81	0,93	1	1,07	0,7	0,8	0,99	1,07	0,7	0,8	0,99	1,07	0,7	0,8	0,99	0,81
Капуста поздняя	12	2100	0,72	0,78	0,87	0,98	1,06	1,1	1,11	1,08	1,03	0,95	0,86	0,8	0,8	0,8	0	0
Овощи (томаты, огурцы)	12	1900	0,78	0,81	0,98	0,98	1,08	1,1	1,09	1,04	0,95	0,82	0,62	0,6	0,6	0,6	0,6	0
Овощи (лук, морковь)	10	1800	0,76	0,79	0,88	0,98	1,06	1,1	1,04	0,97	0,89	0,82	0,8	0,8	0,8	0,8	0	0
ЗОНА ЛЕСОСТЕПИ (*Ку* = 0,51-0,80)																		
Колосовые озимые	6	1400	0,82	0,87	0,96	1,06	1,1	1,06	0,87	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Колосовые яровые	8	1450	0,77	0,81	0,92	1,04	1,1	1,07	0,92	0,7	0,7	0,7	0	0	0	0	0	0
Зернобобовые	6	0	0,83	0,89	0,96	1,05	1,1	1,02	0,86	0,66	0	0	0	0	0	0	0	0

Картофель поздний	10	1850	0,76	0,78	0,85	0,96	1,06	1,1	1,05	0,91	0,7	0,58	0,58	0,58	0	0	0	0
Картофель ранний	10	1400	0,76	0,8	0,89	1,02	1,06	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0	0	0	0	0	0
Кукуруза на зерно	10	2200	0,76	0,78	0,82	0,88	0,97	1,03	1,06	1,04	0,97	0,85	0,73	0,7	0,7	0,7	0	0
Кукуруза на силос	10	1950	0,76	0,78	0,82	0,88	0,97	1,03	1,05	1,04	0,97	0,86	0,72	0,72	0,72	0,72	0	0
Сахарная свекла	10	2400	0,67	0,71	0,75	0,81	0,88	0,93	1	1,05	1,08	1,08	1,05	0,99	0,92	0,80	0	0
Кормовая свекла	8	2000	0,74	0,77	0,83	0,91	1,02	1,1	1,06	0,94	0,8	0,68	0,68	0,68	0,68	0	0	0
Столовая свекла	10	1800	0,8	0,82	0,88	0,95	1,05	1,1	1,06	1,01	0,92	0	0	0	0	0	0	0
Люцерна прошлых лет	6	8	0,86	0,92	1	1,07	1,1	0,82	0,88	1	1,1	0,82	0,88	1	1	1	1	0
Пастбище орошаемое	6	8	0,86	0,96	1,07	0,82	0,92	1,05	0,82	0,93	1,05	0,82	0,93	1,05	0	0	0	0
Однолетние травы	9	8	0,72	0,77	0,86	1	1,1	0,78	0,87	0,98	1,08	1,1	0,78	0,87	0,98	1	1,1	1
Многолетние травосмеси	9	8	0,81	0,93	1	1,07	0,7	0,8	0,99	1,07	0,7	0,8	0,99	1,07	0,7	0,8	0,99	0,81
Капуста поздняя	12	2100	0,81	0,85	0,9	0,95	1,02	1,08	1,1	1,08	1,02	1	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0
Капуста ранняя	10	1400	0,85	0,91	0,96	1,04	1,09	1,08	1,03	0,96	0,96	0,9	0,85	0	0	0	0	0
Овощи (томаты, огурцы)	12	1900	0,82	0,84	0,9	0,96	1,06	1,1	1,06	0,96	0,84	0,84	0,82	0,8	0	0	0	0
Овощи (лук, морковь)	10	1800	0,8	0,82	0,88	0,95	1,05	1,1	1,06	1,01	0,92	0,9	0,85	0,8	0	0	0	0
ЛЕСНАЯ ЗОНА (*Ку* > 0,80)																		
Колосовые озимые	6	1400	0,92	0,94	0,98	1,04	1,08	1,04	0,92	0,72	0,7	0,7	0	0	0	0	0	0
Колосовые яровые	8	1450	0,82	0,86	0,95	1,03	1,08	1,05	0,93	0,76	0,75	0,72	0,7	0	0	0	0	0
Картофель поздний	10	1850	0,78	0,8	0,85	0,94	1,06	1,09	1,04	0,92	0,79	0,69	0,65	0,6	0	0	0	0
Кукуруза на силос	10	1950	0,78	0,8	0,85	0,9	0,97	1,03	1,05	1,04	0,98	0,86	0,85	0,8	0,8	0	0	0
Кормовая свекла	8	2000	0,79	0,81	0,85	0,92	1,04	1,08	1,05	0,97	0,87	0,76	0,75	0,7	0,7	0	0	0
Столовая свекла	10	1800	0,84	0,86	0,91	0,98	1,04	1,08	1,05	1	0,9	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 17

Культура	Расчетный (вегетационный) период		Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	начало	окончание	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Люцерна прошлых лет	6	8	0,92	0,95	1,01	1,06	1,1	0,86	0,9	1,01	1,1	0,86	0,9	1,01	1,1	0,8	0,9	1,0
Пастбище орошаемое	6	8	0,93	0,96	1,02	0,88	0,94	1,02	0,88	0,94	1,02	0,88	0,94	0	0	0	0	0
Однолетние травы	9	2100	0,78	0,82	0,9	1	1,1	0,84	0,92	1	1,08	1,1	0,84	0,92	1	1	1,1	0
Многолетние травосмеси	9	8	0,92	0,95	1,01	1,06	1,1	0,86	0,9	1,01	1,1	0,86	0,9	1,01	1,1	0,8	0,9	0,9
Капуста поздняя	12	2000	0,86	0,92	0,96	1,01	1,05	1,08	1,06	1,03	1,02	1,02	1,02	0,96	0,9	0	0	0
Капуста ранняя	10	1400	0,92	0,94	1	1,06	1,08	1,06	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0	0	0	0	0
Овощи (томаты, огурцы)	12	1900	0,86	0,88	0,95	1	1,05	1,07	1,05	0,98	0,84	0,84	0,82	0,8	0	0	0	0
Овощи (лук, морковь)	10	1800	0,84	0,86	0,91	0,98	1,04	1,08	1,05	1	0,9	0,86	0,84	0,82	0	0	0	0

*Начало вегетации характеризуется весенним переходом среднесуточных температур воздуха через указанные значения, °С.

**У однолетних культур окончание вегетации наступает при указанных суммах среднесуточных температур воздуха, °С.

***У многолетних культур окончание вегетации наступает при осеннем переходе среднесуточных температур воздуха через указанные значения, °С.

Таблица 18

Биоклиматические коэффициенты $K_б$ водопотребления сельскохозяйственных культур (BD URAL)

Культура	Расчётный период		Сумма температур Σt° от начала вегетации															
	начало	конец	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Сухая степь																		
Колосовые озимые	6	1500	0,69	0,75	0,91	1,05	1,09	0,94	0,59	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Колосовые яровые	10	1550	0,60	0,66	0,80	0,98	1,07	1,04	0,83	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Картофель поздний	12	1850	0,56	0,60	0,66	0,80	0,96	1,08	1,10	1,00	0,80	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Картофель ранний	10	1450	0,58	0,62	0,70	0,89	1,06	1,09	0,96	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукуруза на силос	12	1950	0,53	0,56	0,62	0,74	0,89	1,01	1,07	1,07	1,01	0,85	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукуруза на зерно	12	2300	0,52	0,55	0,62	0,74	0,89	1,01	1,07	1,07	1,01	0,86	0,69	0,48	0,48	0,00	0,00	0,00
Сахарная свёкла	8	2800	0,55	0,58	0,62	0,69	0,78	0,89	0,99	1,06	1,10	1,10	1,06	0,98	0,84	0,68	0,62	0,00
Кормовая свёкла	8	2200	0,53	0,57	0,65	0,79	0,94	1,06	1,09	1,03	0,82	0,58	0,53	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00
Люцерна прошлых лет	6	8	0,70	0,80	1,00	1,09	0,66	0,75	1,00	1,09	0,66	0,75	1,00	1,09	0,66	0,75	1,00	1,09
Капуста поздняя	12	2200	0,70	0,75	0,82	0,92	1,02	1,08	1,07	0,99	0,87	0,75	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Капуста ранняя	12	1400	0,73	0,80	0,92	1,06	1,07	1,01	0,90	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Овощи (томаты, огурцы)	12	2000	0,70	0,75	0,83	0,95	1,07	1,09	1,04	0,90	0,74	0,56	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Овощи (лук, морковь)	10	1800	0,64	0,69	0,77	0,90	1,03	1,07	1,01	0,87	0,70	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Умеренная степь																		
Колосовые озимые	6	1500	0,72	0,81	0,93	1,04	1,08	0,96	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Колосовые яровые	10	1550	0,66	0,72	0,85	0,99	1,07	1,03	0,82	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Картофель поздний	12	1850	0,64	0,67	0,74	0,85	0,97	1,07	1,09	1,01	0,83	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Картофель ранний	10	1450	0,64	0,67	0,75	0,93	1,05	1,07	0,95	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукуруза на силос	12	1950	0,60	0,63	0,70	0,80	0,91	1,01	1,06	1,06	1,00	0,87	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Продолжение табл. 18

Культура	Расчётный период		Сумма температур Σt° от начала вегетации															
	начало	конец	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Кукуруза на зерно	12	2300	0,59	0,62	0,70	0,80	0,91	1,01	1,06	1,06	1,00	0,87	0,70	0,52	0,52	0,00	0,00	0,00
Сахарная свёкла	8	2700	0,60	0,64	0,69	0,76	0,84	0,92	1,00	1,06	1,09	1,09	1,05	0,99	0,88	0,75	0,70	0,00
Кормовая свёкла	8	2000	0,62	0,67	0,74	0,84	0,97	1,05	1,08	1,02	0,85	0,65	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Люцерна прошлых лет	6	8	0,75	0,83	1,01	1,08	0,70	0,78	1,01	1,08	0,70	0,78	1,01	1,08	0,70	0,78	1,01	1,08
Капуста поздняя	12	2000	0,75	0,79	0,85	0,94	1,02	1,07	1,06	0,99	0,90	0,81	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Капуста ранняя	12	1400	0,77	0,84	0,95	1,05	1,06	1,01	0,96	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Овощи (томаты, огурцы)	12	2000	0,74	0,78	0,85	0,96	1,06	1,08	1,03	0,93	0,78	0,65	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Овощи (лук, морковь)	10	1800	0,70	0,74	0,82	0,92	1,03	1,06	1,00	0,90	0,76	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Лесостепная зона																		
Колосовые озимые	6	1500	0,79	0,85	0,95	1,04	1,07	1,00	0,74	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Колосовые яровые	10	1550	0,74	0,79	0,89	0,99	1,06	1,03	0,87	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Картофель поздний	12	1850	0,74	0,77	0,83	0,89	0,99	1,07	1,08	1,01	0,86	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Картофель ранний	10	1450	0,75	0,79	0,86	0,96	1,05	1,05	0,90	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукуруза на силос	12	1950	0,73	0,75	0,79	0,86	0,94	1,01	1,05	1,05	1,00	0,89	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кукуруза на зерно	12	2300	0,74	0,76	0,80	0,87	0,95	1,01	1,05	1,05	1,00	0,89	0,75	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Сахарная свёкла	8	2600	0,67	0,71	0,75	0,81	0,88	0,93	1,00	1,05	1,08	1,08	1,05	0,99	0,92	0,82	0,75	0,00
Кормовая свёкла	8	1900	0,74	0,77	0,82	0,90	0,99	1,05	1,06	1,00	0,87	0,70	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Люцерна прошлых лет	6	8	0,82	0,88	1,02	1,07	0,78	0,85	1,02	1,07	0,82	0,88	1,02	1,07	0,82	0,88	1,02	1,07
Капуста поздняя	12	2000	0,80	0,83	0,89	0,96	1,03	1,07	1,06	1,00	0,92	0,83	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Капуста ранняя	12	1400	0,83	0,88	0,97	1,05	1,05	1,02	0,98	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Овощи (томаты, огурцы)	12	2000	0,80	0,83	0,88	0,97	1,05	1,07	1,02	0,95	0,84	0,75	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Овощи (лук, морковь)	10	1800	0,73	0,77	0,84	0,93	1,02	1,05	1,00	0,91	0,80	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 19

Зависимость глубины корнеобитаемого слоя сельскохозяйственных культур h_k (м) от суммы среднесуточных температур воздуха $\Sigma t°$.

АРИДНАЯ ЗОНА

Культура	Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Колосовые озимые	0,55	0,6	0,75	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Колосовые яровые	0,40	0,45	0,60	0,75	0,90	0,90	0,90	0,90	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Зернобобовые	0,35	0,45	0,6	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
Картофель поздний	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75
Картофель ранний	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75
Кукуруза (зерно)	0,4	0,45	0,6	0,75	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Кукуруза (силос)	0,4	0,45	0,6	0,75	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Кукуруза пожнив-ная	0,4	0,45	0,6	0,75	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Сахарная свекла	0,4	0,45	0,55	0,7	0,8	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85
Кормовая свекла	0,35	0,4	0,5	0,65	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75
Столовая свекла	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
Люцерна подпок-ровная	0,6	0,65	0,8	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Люцерна прошлых лет	0,65	0,7	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Пастбище орошае-мое	0,45	0,5	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6

Продолжение табл. 19

Культура	Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Однолетние травы	0,35	0,4	0,6	0,75	0,8	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85
Многолетние травосмеси	0,5	0,55	0,65	0,75	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Капуста поздняя	0,30	0,35	0,40	0,50	0,55	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	-	-	-	0,6
Капуста ранняя	0,3	0,35	0,4	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6
Овощи (томаты, огурцы)	0,3	0,35	0,45	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6
Овощи (лук)	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5

Таблица 20

Зависимость глубины корнеобитаемого слоя сельскохозяйственных культур h_k (м) от суммы среднесуточных температур воздуха $\Sigma t°$.

ГУМИДНАЯ ЗОНА

Культура	Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Колосовые озимые	0,5	0,55	0,65	0,75	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Колосовые яровые	0,35	0,4	0,55	0,7	0,75	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Зернобобовые	0,35	0,45	0,6	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
Картофель поздний	0,3	0,35	0,45	0,55	0,6	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65
Картофель ранний	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65
Кукуруза (зерно)	0,4	0,5	0,65	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Кукуруза (силос)	0,35	0,4	0,55	0,7	0,75	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Сахарная свекла	0,4	0,45	0,6	0,7	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Кормовая свекла	0,3	0,35	0,45	0,55	0,65	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
Столовая свекла	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65
Люцерна подпокровная	0,5	0,55	0,65	0,75	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
Люцерна прошлых лет	0,5	0,55	0,6	0,65	0,75	0,8	0,85	0,9	-	-	-	-	-	-	-	0,9
Пастбище орошаемое	0,4	0,45	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6

Продолжение табл. 20

Культура	Сумма среднесуточных температур воздуха нарастающим итогом от начала вегетации, °С															
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000	3000-3200
Однолетние травы	0,3	0,35	0,5	0,65	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75
Многолетние травосмеси	0,45	0,5	0,6	0,7	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75
Капуста поздняя	0,3	0,35	0,4	0,5	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6
Капуста ранняя	0,3	0,35	0,45	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6
Овощи (томаты, огурцы)	0,3	0,35	0,45	0,55	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6
Овощи (лук)	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5

5. ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛИВОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Для получения высоких и устойчивых урожаев на поливных землях режимы орошения должны учитывать биологические особенности возделываемых культур, местные климатические, почвенно-мелиоративные, погодные и другие условия, а также способы, технические средства и технологию полива. При этом должны учитываться все изменения, которые неизбежно возникают на оросительных системах в процессе эксплуатации. В условиях недостатка оросительной воды эксплуатационные режимы орошения должны предусматривать подачу экономически целесообразных оросительных норм с учетом наличных водных ресурсов и приоритетности орошаемых культур.

Соотношение между водозабором и водопотреблением меняется по годам с различным знаком. При этом следует отметить относительную стабильность фактического водозабора на орошение и площадей фактически политых земель по сравнению с изменчивостью по годам нормативного водопотребления на орошение.

С одной стороны, система учета использования вод в орошаемом земледелии базируется на недостоверных первичных данных о водопотреблении. Нередко принимаются аналогичные предыдущему году значения объемов водозабора. С другой, нормы водопотребности (групповые, средневзвешенные по культурам и по площади) представлены недостаточно, так как определяются по одной-двум опорным метеостанциям на весьма значительную и разнородную территорию административной области.

Кроме того, требуют уточнения площади фактически политых земель и структура орошаемых посевов на каждый расчетный год, что в настоящее время представляет сложность.

В сложившейся ситуации основным резервом повышения эффективности орошения должно стать рациональное и экономное использование имеющихся водных ресурсов благодаря совершенствованию технологий планирования орошения.

В достижении этой цели главная роль должна быть отведена нормированию водопользования.

Таким образом, кроме разработки научно обоснованных, дифференцированных территориально и по годам режимов орошения, необходимо создание специализированной службы по реализации этих режимов. Без решения этих вопросов и внедрения их в производство дальнейшее повышение продуктивности орошаемого земледелия представляется проблематичным.

Для орошаемых земель одним из приоритетов является оперативное планирование и управление поливами с оптимизацией сроков и норм их проведения.

Оперативное планирование эксплуатационных режимов орошения с использованием математических моделей и компьютерной технологии повышает точность нормирования объемов подачи воды на полив, обеспечивая эффективность гидромелиорации на различных природно-ландшафтных территориях, адекватный выбор антропогенных воздействий, экологическое равновесие природной среды и ресурсосбережение.

Для достижения наибольшего эффекта от орошения, особенно в условиях непрерывного нарастания дефицита водных ресурсов, контроль влажности почвы сельскохозяйственного поля и управление поливами должны проводиться систематически, не реже одного раза в пять дней, а в периоды критических фаз развития растений – ежедневно. Такая периодичность оценки ситуаций и выработки управляющих решений на предстоящий (прогнозный) период позволяет с высокой надежностью оптимизировать сроки и нормы полива на каждом поливном участке.

Для оперативной корректировки эксплуатационных режимов орошения и расчета доз внесения минеральных удобрений с поливной водой в ФГБНУ ВНИИ «Радуга» разработаны и продолжают совершенствоваться компьютерные программы. В 2008 г. создана и апробирована компьютерная программа «Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование». Расчетный метод основан на оценке уравнения водного баланса применительно к почвенному слою активного влагообмена.

Приходные статьи баланса (осадки, поливы) учитываются непосредственным измерением, а расходная часть уравнения (суммарное испарение с поля) рассчитывается по метеорологическим данным.

Проведение поливов по годовому плану водопользования без учета фактической динамики метеорологического режима может привести к подаче на поля избыточного или недостаточного количества воды, что в наиболее ответственные фазы развития растений приводит к потере всей или большей части прибавки урожая, а также усиливает разрушающее воздействие на почву.

Методические основы оперативного управления поливами включают в себя ежедневную оценку почвенных влагозапасов в слое активного влагообмена, динамично связанных с видом и фазой развития сельскохозяйственной культуры.

В каждом конкретном случае при близком залегании грунтовых вод дефициты водопотребления орошаемых культур необходимо корректировать, используя опытные и расчетные данные.

Основная задача на стадии реализации эксплуатационных режимов орошения состоит в оценке основных факторов, обусловливающих необходимость корректировки режима поливов, анализе информации и принятии решения о внесении изменений в планируемый режим орошения.

5.1. Информационно-советующая система планирования водопользования. Основные компоненты ИСС

Информационно-советующая система (ИСС) планирования водопользования предполагает использование новых технических средств и экологически безопасных технологий орошения, учитывает изменчивость гидрометеорологических условий в пространстве и во времени и нелинейный характер взаимодействия внешних и внутренних факторов, определяющих водный режим, суммарное испарение и продуктивность агробиоценозов (рис. 14).

Информационная технология включает в себя сбор исходной информации по различным природным и хозяйственно-мелиоративным показателям объекта.

Собранная информация используется в моделях оценки потенциала ресурсов тепла и влаги на территории объекта при разработке систем регулирования природно-мелиоративных процессов, обосновании выбора вида мелиораций с расчетом объемов восполнения дефицитов природных ресурсов.

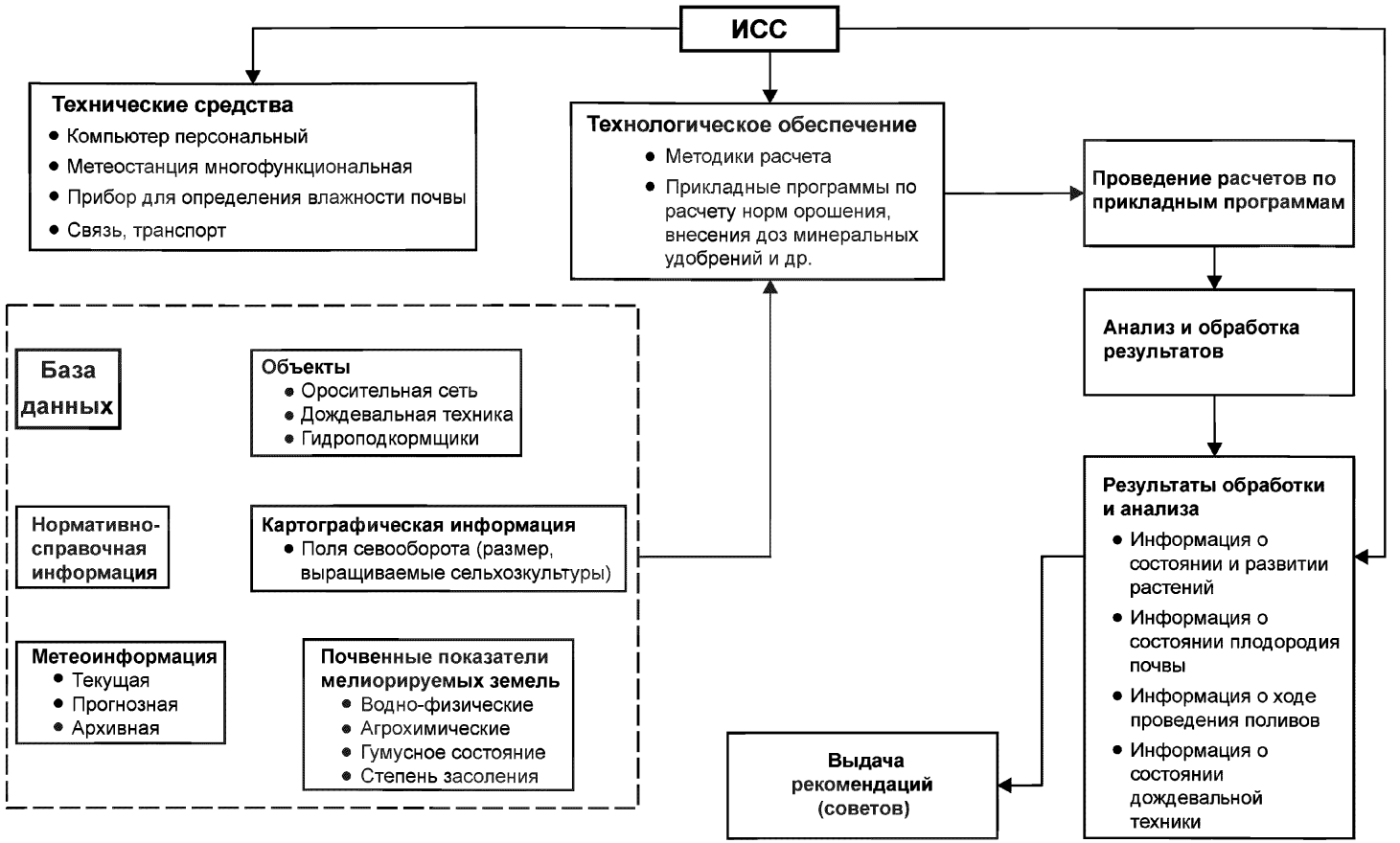


Рис. 14. Технические условия системы ИСС для управления продуктивностью орошаемых агробиоценозов с разработкой приборов, средств измерения и контроля параметров почвенного плодородия, надежности работы и качества эксплуатации оросительной техники

Информационная технология предусматривает разработку расчетных моделей и компьютерных программ для определения параметров мелиорации, в частности нормирования орошения. Следует отметить, что обоснованные, экологически сбалансированные нормы орошения представляют собой один из важнейших информационных ресурсов, гарантирующих устойчивость агроландшафтов и повышение их продуктивности.

Компьютерные технологии дают возможность строить систему орошения, учитывая влияние на продуктивность агроценозов и динамику водного режима всех основных гидрометеорологических факторов, создать научно обоснованную форму оперативной корректировки эксплуатационных режимов орошения на основе современных персональных компьютеров с учетом складывающихся и прогнозных погодных, организационно-хозяйственных, почвенно-климатических и мелиоративных условий.

Разработанная ФГБНУ ВНИИ «Радуга» информационно-советующая система рассчитывает рациональные нормы водопотребления с использованием компьютерных моделей при дифференциации коэффициентов, параметров и констант, входящих в математические зависимости, что обеспечивает отражение динамики внутригодового распределения гидрометеорологических факторов, вероятностный характер процессов, протекающих в агробиоценозах (рис. 15).

В разработке могут использоваться снимки и спутниковые карты, различное спутниковое оборудование и наземные устройства, следящие за метеорологическими и гидрологическими параметрами, состоянием и изменением растительного покрова.

ИСС состоит из следующих основных блоков:

• анализа текущего состояния агроценозов;

• сбора и обработки фактической и прогнозной метеоинформации;

• расчета оперативного планирования поливов (наличие компьютера и программного обеспечения);

• выдачи рекомендаций.



Рис. 15. Структурно-функциональная схема оперативного управления поливами

Блок анализа текущего состояния агроценозов контролирует влажность почвы за неделю (мм).

Блок сбора и обработки фактической и прогнозной метеоинформации осуществляет измерение температуры (°С) и влажности воздуха (%), скорости ветра (м/с), количества осадков (мм).

Блок расчета оперативного планирования поливов производит расчет показателей тепловых ресурсов и влагообеспеченности территории – испаряемость, почвенные влагозапасы, капиллярный приток из грунтовых вод, коэффициенты природного увлажнения, отражающие соотношение приходных и расходных частей водного баланса; суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур, определяемое по биоклиматической модели с использованием биологических, микроклиматических коэффициентов и почвенно-мелиоративных констант, адаптированных для конкретных условий региона; дефицита водопотребления; оперативное планирование поливов.

Блок выдачи рекомендаций выдает на бумажном носителе уточненные графики полива на ближайшие 3-5 суток (рис. 16).

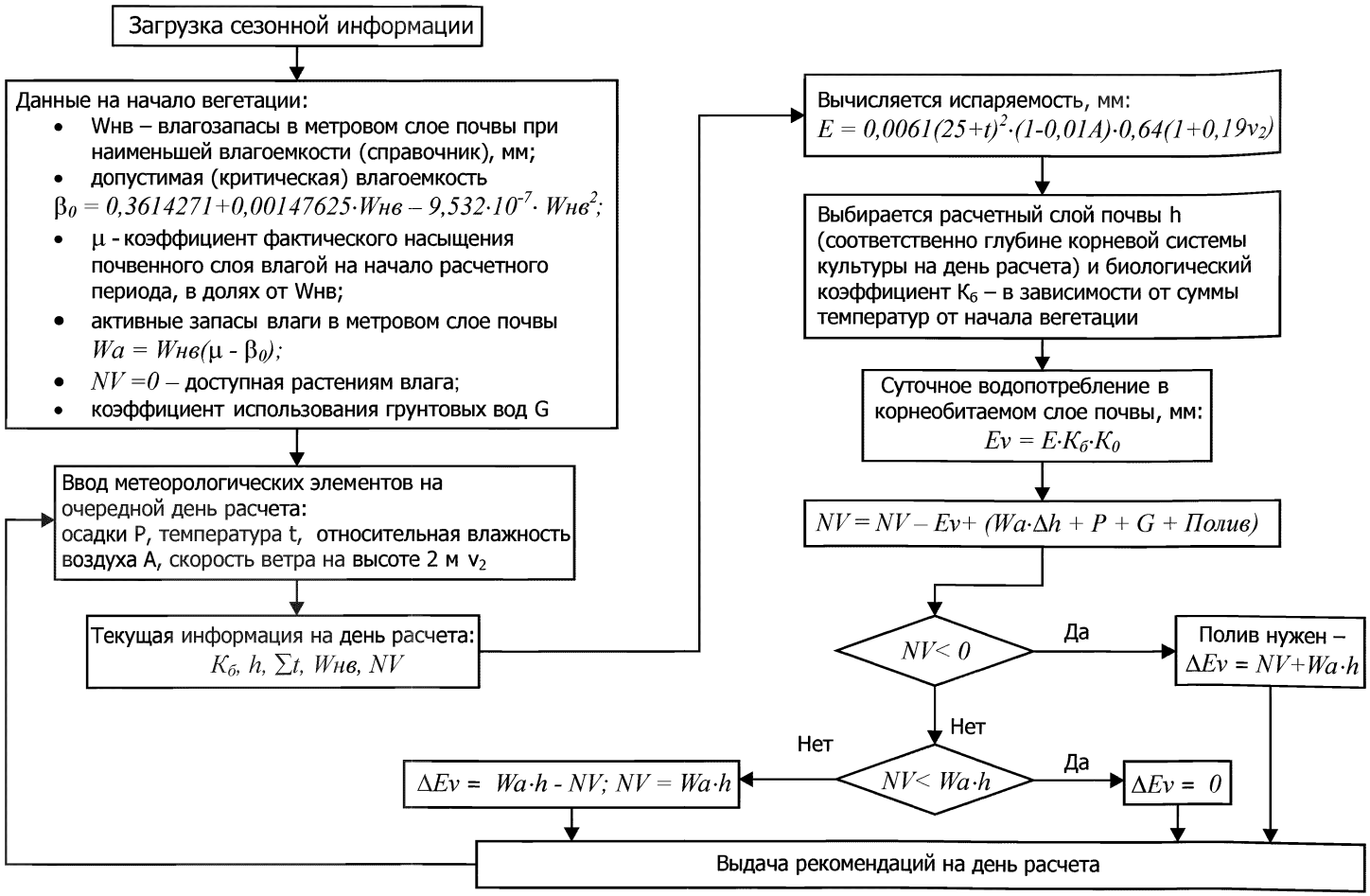


Рис. 16. Схема оперативного расчета почвенных влагозапасов с выдачей рекомендаций по поливу

Реализация эксплуатационных режимов орошения и их оптимизация (на основе оперативного управления поливами) заключаются в следующем:

• корректировка и управление режимами поливов осуществляются по «требованию» для поливных участков, обслуживаемых дождевальной машиной;

• на поливных участках измеряется влажность почвы в начале вегетационного периода, а в течение вегетационного периода, через каждые пять дней, декаду или месяц, с целью контроля изменения запасов влаги в почве расчетным методом;

• на каждом севооборотном участке систематически производятся контрольные замеры реализованных поливных норм и равномерность их распределения по площади и глубине;

• проводятся:

систематический сбор текущей и прогнозной метеорологической информации;

сбор сведений о состоянии посевов, ходе агротехнических мероприятий, готовности поливной техники, оросительной сети и насосных станций;

обработка полученной информации и выполнение водобалансовых расчетов на текущий и пятидневный, декадный прогнозные периоды;

• по полученным данным оценивается сложившаяся ситуация и принимается решение о целесообразности и размерах корректировки режима орошения сельскохозяйственных культур.

В информационно-советующей системе используются:

• компьютерная программа «Расчет параметров режимов орошения сельскохозяйственных культур» (2004 г.). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ за № 2004610996 от 22 апреля 2004 г.;

• компьютерная программа «Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование» (2008 г.). Свидетельство об официальной регистрации № 2009610137, дата регистрации 11.01.2009;

• база данных «Метеоинформация». Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2006620309, дата регистрации 06.10.2006.

5.2. Исходные требования к ИСС

Назначение информационно-советующей системы – создание научно обоснованной формы оперативной корректировки эксплуатационных режимов орошения с учетом фактических и прогнозных почвенно-климатических, организационно-хозяйственных и мелиоративных условий.

Для этих целей в состав ИСС вводится подсистема оперативного планирования эксплуатационных режимов орошения для управления продуктивностью орошаемых агробиоценозов.

В состав технических средств входят персональный компьютер IBM PC Intel от Pentium III – 750 МГц, метеостанция Vantage Pro2 и датчики влажности почвы.

Многофункциональный метеорологический комплекс Vantage Pro2 предназначен для профессионального применения, имеет функцию прогноза погоды, которая учитывает координаты места расположения комплекса, время года, текущее значение атмосферного давления и его изменение, скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха, количество осадков. Эти параметры измеряются датчиками, которыми укомплектован метеокомплекс.

Комплект метеостанции Vantage Pro2 включает в себя блок внешних метеодатчиков (рис. 17) и консоль.

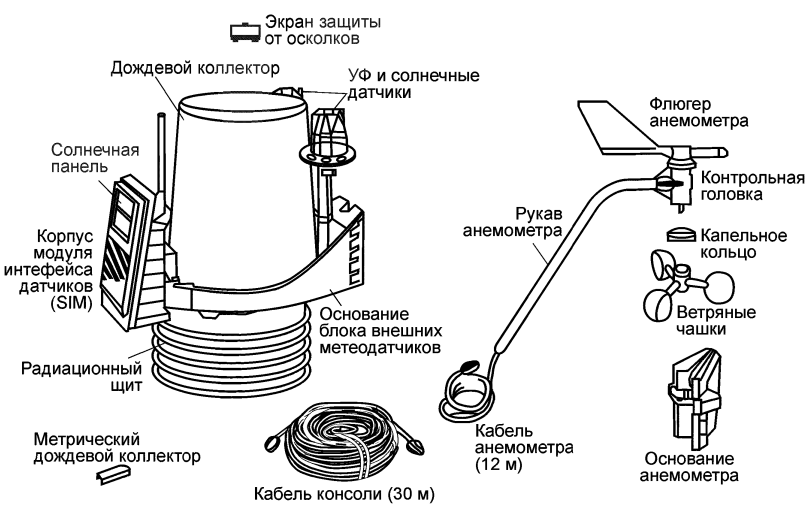
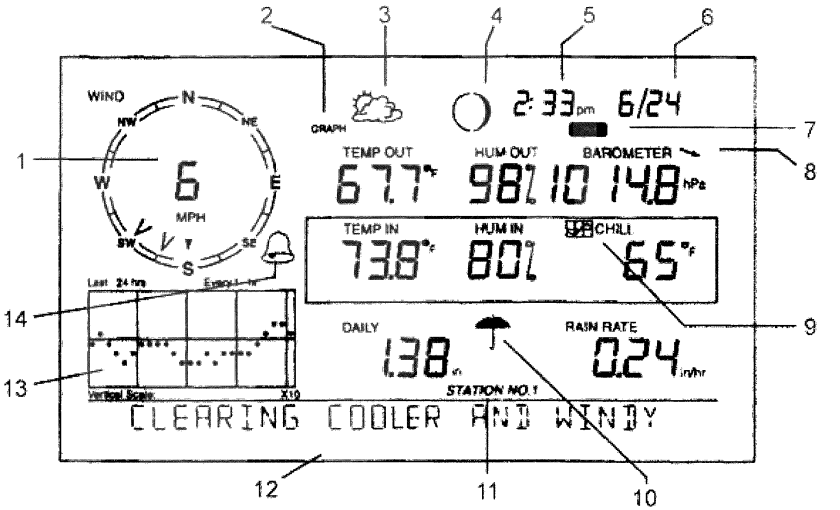


Рис. 17. Комплект блока внешних метеодатчиков

Блок внешних метеодатчиков Integrated Sensor Suite (ISS) собирает внешние метеорологические данные и передает эти данные на консоль управления погодной станции Vantage Pro2. Функции дисплея консоли приведены на рис. 18, режимы ее работы – в табл. 21.



1 – роза компаса; 2 – настройка режимов GRAPH &Hi/Low;
3 – пиктограмма прогноза; 4 – индикатор фазы луны;
5 – время/ время восхода Солнца; 6 – дата/ дата восхода Солнца;
7 – индикатор второй кнопки; 8 – барометрический тренд стрелки;
9 – индикатор графического режима; 10 – индикатор дождя в настоящий момент;
11 – индикатор номера станции; 12 – погодный индикатор;
13 – графическое поле; 14 – иконка аварийного сигнала

Рис. 18. Функции дисплея консоли

Диапазон контролируемых параметров

температура воздуха, °С	0-50
влажность воздуха, %	25-100
скорость ветра, м/с	0-60
осадки, мм	0 – не ограничено

Таблица 21

Режимы работы консоли

Режим	Описание
Setup	Режим установок для программирования даты, времени и другой информации, необходимой для калькуляции и индикации метеоданных

Продолжение табл. 21

Режим	Описание
Current Data	Режим текущих данных для считывания текущих метеопоказаний, изменения единиц измерения, установки, удаления или калибровки показаний метеоданных
High/low	Режим High/low отображает дневные, месячные или годовые пиковые показания
Alarm	Режим аварийных сигналов позволяет настроить, удалить или просмотреть настройки передачи аварийного сигнала
Graph	Графический режим позволяет отобразить различные метеоданные в виде 100 различных графических представлений

Стандартный комплект блока ISS содержит:

• дождевой коллектор;

• датчик температуры;

• датчик влажности (для максимального уменьшения воздействия солнечного излучения на показания датчиков; датчики температуры и влажности устанавливают в щите пассивной радиационной защиты);

• анемометр (измеряет скорость и направление ветра и может быть установлен как рядом с блоком ISS, так и отдельно от него).

Датчики метеокомплекса собраны в единый блок, что делает установку Vantage Pro2 очень простой.

К особенностям Vantage Pro2 относятся:

• большой дисплей (150×90 мм);

• интервал опроса датчиков от 2,5 с;

• уникальный алгоритм прогноза погоды, учитывающий не только атмосферное давление, но и температуру, влажность, скорость и направление ветра, количество осадков, координаты места расположения метеокомплекса, время года;

• отображение на экране графиков изменения метеопараметров (24 точки, различные интервалы);

• 35 звуковых предупреждений на выбранные функции;

• компьютерный интерфейс с объемом памяти 2560 записей всех метеопараметров с указанием даты и времени.

На многофункциональном дисплее метеокомплекса отображаются атмосферное давление, уличная и комнатная температура

воздуха, уличная и комнатная относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра, температура точки росы, количество и интенсивность осадков, дата и время, прогноз погоды, фаза Луны, время восхода и захода Солнца (табл. 22).

Таблица 22

Спецификация метеопеременных

Параметры	Разрешение	Диапазон	Точность
Основные показатели			
Атмосферное давление, мм рт. ст.	0,1	660-810	0,8
Температура воздуха снаружи помещения, °С	0,1	-40...65	0,5
Относительная влажность воздуха снаружи помещения, %	1	0-10	3
Скорость ветра, м/с (км/ч)	0,1 (1)	1-67 (3-241)	5%
Дополнительные показатели (при наличии дополнительных датчиков)			
Температура, °С:			
воздуха внутри помещения	0,1	0-60	0,5
охлаждения ветром	1	-79...54	1
точки росы	1	-76...54	1,5
почвы и воды	1	-40...65	0,5
Мнимая температура воздуха, °С	1	-45...57	1,5
Индекс THCW	1	-68...64	2
Общая температура на открытом воздухе, учитывающая температуру и влажность воздуха, нагревающий эффект Солнца и охлаждающий эффект ветра	1	10-60	0,5
Относительная влажность воздуха внутри помещения, %	1	10-90	5
Влажность:			
листвы, баллы	1	0-15	0,5
почвы, сантибары	1	0-200	
Суммарное испарение, мм	0,1	0-1999	5%
Интенсивность выпадения осадков, мм/ч	0,1	0-1999	5%

Продолжение табл. 22

Параметры	Разрешение	Диапазон	Точность
Суточное и суммарное выпадение осадков, мм	0,2	0-19999	4%
Направление ветра	1° или 10°	0°-360°	7°
Отображение направления ветра по шкале компаса	22,5°	16 делений компаса	7°
Интенсивность солнечного излучения, Вт/м^2	1	0-1800	5%
Плотность потока солнечной энергии, Дж/см^2	0,1	0-1999,9	5%
Ультрафиолетовое излучение:			
доза, MED	0,1	0-199	5%
индекс	0,1	0-16	5%

Для автоматического формирования БД предложена схема передачи и накопления метеорологической информации (рис. 19). Передача может осуществляться двумя способами.

Первый – метеорологические показатели датчиков метеостанции по радиоканалу передаются на консоль, в стандартном исполнении максимальное расстояние передачи данных составляет 100 м. Использование антенн направленного действия, установленных на консоли и метеостанции, позволяет увеличить расстояние передачи данных до 8 км. Затем данные с консоли через USB-кабель передаются на ПК. Программа WeatherLink, установленная на ПК, позволяет в режиме реального времени просматривать поступающие с метеостанции данные (рис. 20). Также создается архив данных, который хранится в директории C:\WeatherLink\Метеостанция\2009-06.wlk.

Второй способ предусматривает использование на метеостанции GSM-модема. Метеорологическая информация передается через спутник на сервер в сети Internet, при этом расстояние передачи данных не ограничено. На сервере информация также хранится в файле \2009-06.wlk. Недостатком такой схемы являются дополнительные затраты на оплату Интернета и содержание сервера. После того как данные оказались на сервере, производятся настройки программы WeatherLink. После завершения настроек программа обращается к серверу, данные скачиваются и отображаются на экране ПК.

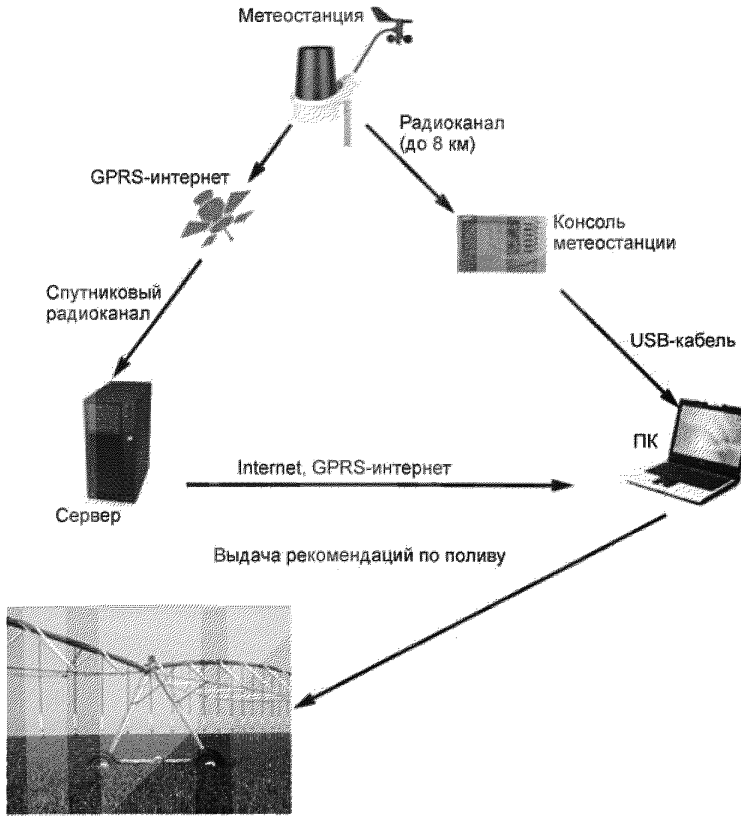


Рис. 19. Схема передачи и накопления метеорологической информации

Так как файл формата .wlk не распознается ни одним стандартным приложением ПК, то в программе WeatherLink предусмотрен экспорт данных в .txt файл (рис. 21). Из .txt файла данные можно перевести в любую другую программу для анализа или дальнейшего расчета.

Также в программе WeatherLink можно производить предварительный анализ данных. Вся полученная информация отражается в виде графиков (рис. 22).

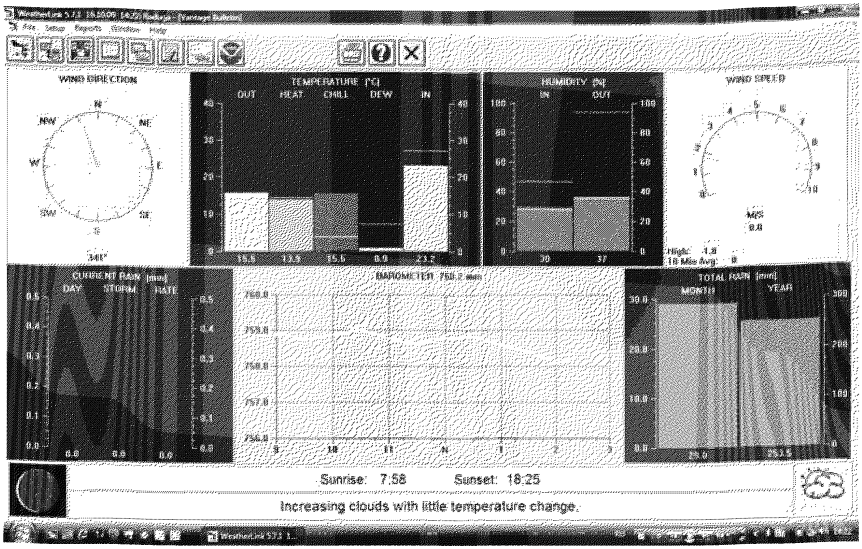


Рис. 20. Просмотр показателей метеостанции в режиме реального времени

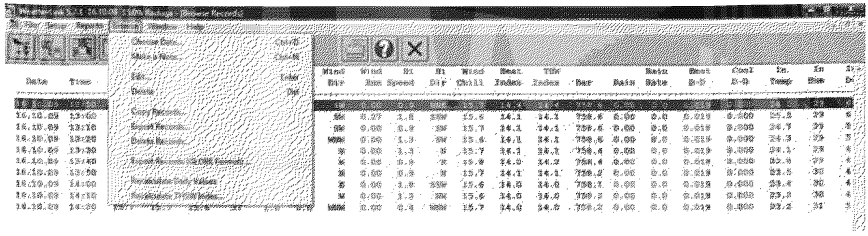


Рис. 21. Экспорт метеоданных в.txt файл

Использование данного приложения позволяет комплексно оценивать всю метеорологическую информацию и дает возможность преобразовывать данные в необходимый формат для дальнейшей работы с информацией.

Контроль влажности почвы. Определение влажности почвы орошаемого агробиоценоза производится с помощью почвенных датчиков, тарируемых с использованием методик и оборудования, приведенных в табл. 23.

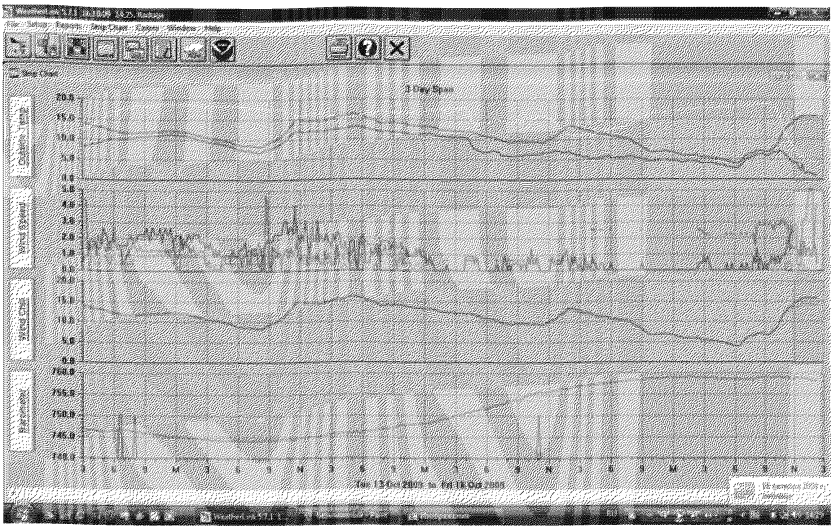


Рис. 22. Графическое отображение метеоинформации

Таблица 23

Основные контролируемые показатели формирования почвенного плодородия орошаемых агробиоценозов и средства для их измерения

Наименование показателя	Методика определения	Средства измерения, приборы
Агрофизические свойства		
Мощность пахотного горизонта, см	Метод прикопок	Лопата, измерительная аппаратура
Гранулометрический состав	По Качинскому	
Агрегатный состав почвы	По Савинову	Набор сит
Водопрочность агрегатов		
Равновесная плотность в пахотном и подпахотном горизонте, г/см^3	Метод режущих колец	Режущие кольца, бюксы алюминиевые вместимостью 200-300 мл, сушильный шкаф

Продолжение табл. 23

Наименование показателя	Методика определения	Средства измерения, приборы
Водно-физические свойства		
Полевая (наименьшая) влагоёмкость, %	Метод заливаемых площадок	Ёмкость для воды, весы, сушильный шкаф
Влажность почвы пахотного горизонта, %	Термостатно-весовой метод	Бур, бюксы, весы, сушильный шкаф
Максимальная гигроскопическая влажность и влажность устойчивого завядания, %	ГОСТ 28268-89	Сушильный шкаф, эксикатор, стеклянные бюксы, весы аналитические
Физико-химические свойства		
pH	ГОСТ 26483-85	Иономер, весы лабораторные, химическая посуда, стандарт-титры
Органическое вещество, %		Муфельная печь, тигли, сушильный шкаф
Гидролитическая кислотность, мг-экв. на 100 г		Иономер, лабораторная посуда
Обменный аммоний, мг/кг	ГОСТ 26489-85 (по методу ЦИНАО)	Фотоколориметр
Нитраты, мг/100 г почвы	ГОСТ 26951-86 (ионометрический)	Иономер, электроды, химическая посуда, реактивы
Валовое содержание питательных элементов		
Азот, мг/100 г почвы	ГОСТ 26107-84	Прибор Сиренева
Подвижные (доступные для растений) формы		
Гидролизуемый азот, мг/100 г почвы	Метод Тюрина и Кононовой	Прибор Къелдаля, реактивы, лабораторная посуда
Подвижный фосфор, мг/100 г почвы	ГОСТ 26207-91	Спектрофотоколориметр
Обменный калий, мг/100 г почвы		Пламенный фотометр

Продолжение табл. 23

Наименование показателя	Методика определения	Средства измерения, приборы
Магний, мг/100 г почвы Кальций, мг/100 г почвы	ГОСТ 26487-85	Бюретки, лабораторная посуда, реактивы
Натрий, мг/100 г почвы	ГОСТ 26426-85	Иономер, электроды, химическая посуда, реактивы
Урожайность, ц/га	Метод сплошной уборки (метод учётных площадок)	Весы, вычислительная аппаратура

5.3. Компьютерная программа оперативного планирования поливов

Компьютерная программа, один из режимов которой осуществляет расчет для ИСС (режим «Рассчитать сезон»), разработана в ВНИИ «Радуга» в 2008 г. на основе имеющихся методик и программ с учетом современных требований и с использованием математического аппарата. Номер Государственной регистрации 2008615169, рабочее название «Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование (Raduga Irrigation)».

Программный комплекс работает в следующих режимах:

1. Добавление новых метеостанций (метеоданных) и культур, которые еще не включены в рабочую базу данных программы (рис. 23);

2. Расчет динамики тепло-, влагообеспеченности за многолетний период для культур и метеостанций, включенных в рабочую базу. Введен расчет биоклиматического потенциала (БКП), характеризующего потенциальную продуктивность климата. Значения БКП могут изменяться от 1 до 5,2 при достаточном увлажнении и от 0,6 до 4,68 – при недостаточном [49];

3. Режим для оперативного расчета влагозапасов почвы и поливной нормы одного сезона (года) на основе фактических и вновь вводимых данных с периодом (или шагом) расчета от одного часа. Расчет проводится с начала вегетационного периода до любой указанной даты для определенной сельскохозяйственной культуры с использованием прогнозных метеоданных;

4. Аналитический раздел используется при математической обработке результатов расчета и построении сплайн-функций.

Добавление новых метеостанций и культур (Add Data)

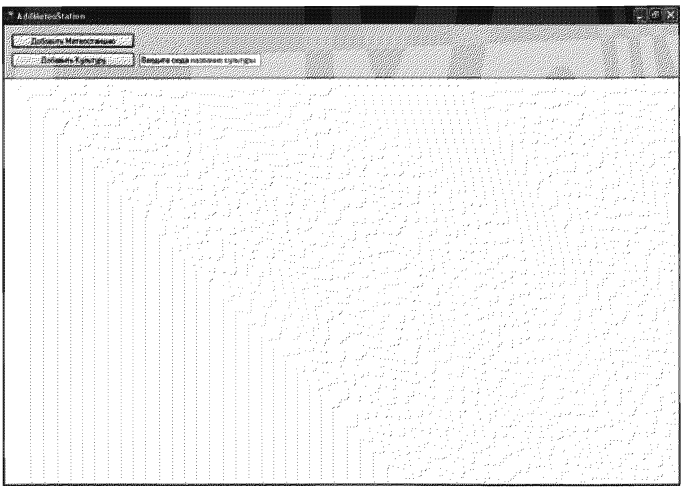


Рис. 23. Панель режима Add Data

Культуры, вводимые в состав рабочей базы данных программы, рекомендуется предварительно описать в дополнительном (вспомогательном) файле «Культуры», для удобства сформированном в Excel.

В файле для формирования рабочей базы программы предлагается следующий порядок расположения информации.

Первые четыре таблицы файла (лист «общий») – значения коэффициента *Кб* по зонам для региона BD OSN, объединяющего европейскую часть земледельческой территории. Значения коэффициентов приведены в соответствии с суммами температур от начала вегетации с шагом 200°С.

При переносе данных на именные листы Excel (лист организован по каждой культуре) порядок зон следующий: сухая степь, умеренная степь, лесостепь, лесная зона.

Следующие четыре таблицы – это значения коэффициента *Кб* по зонам для региона BD URAL, включающего в себя земледельческую территорию Урала, Зауралья и Западной Сибири.

Следующие две таблицы – зависимость глубины корнеобитаемого слоя *hk* (м) сельскохозяйственных культур от суммы среднесуточных температур воздуха Σt° для BD OSN соответственно для аридной и гумидной зон.

Следующие две таблицы – зависимость глубины корнеобитаемого слоя *hk* (м) сельскохозяйственных культур от суммы среднесуточных температур воздуха Σt° для BD URAL соответственно для аридной и гумидной зон.

Все перечисленные таблицы могут дополняться в связи с потребностью (в расчете на культуры, еще не введенные в рабочую базу программы).

На основе этих таблиц формируются ***файлы данных по заданному формату для каждой культуры*** (пополнение рабочей базы программы) и переносятся в рабочие поля программы при расчете.

Каждая культура располагается на отдельном листе Excel файла «Культуры», название которого для удобства совпадает по написанию с названием культуры.

Формат заполнения листа следующий.

В строки 1- 6 для BD OSN, начиная со столбца A, последовательно копируется информация по культуре: первая строка – *для пустынь*, вторая – *для полупустынь* (если эти зоны не участвуют в расчетах, то строки до позиции S1 заполняются нулями); третья – для зоны *сухих степей*: температура начала вегетации (A3); сумма температур вегетационного периода культуры (B3); C3-R3 – значения биологического коэффициента *Кб* в соответствии с суммами температур от начала вегетации с шагом 200°C; S3 – коэффициент фактического насыщения влагой μ.

Далее, с позиции A4 (четвертая строка), копируется аналогичная информация для зоны *умеренной степи*, с A5 – *для лесостепной зоны*, с A6 – *для лесной*.

С позиции A7 копируется глубина корнеобитаемого слоя *hk* (м) сельскохозяйственных культур в зависимости от суммы среднесуточных температур воздуха Σt° для BD OSN соответственно для аридной зоны, с позиции A8 – аналогичная информация для гумидной зоны.

Далее вся информация (строки 1-8) повторяется для BD URAL (заполняются строки 9-16).

После того, как лист сформирован, ***культуру можно включать в рабочую базу*** программы с помощью режима Add Data.

Для этого следует скопировать весь лист. Затем поместить его в поле, предложенное программой при включенном режиме Add Data, далее ввести в предложенное окно название культуры и нажать клавишу «Добавить культуру».

Возможен ввод данных в предложенное окно вручную с соблюдением места расположения данных и правил ввода (t – табуляция для ввода с заданной позиции, / – разделитель чисел, h – переход на новую строку).

Метеоданные вставляются аналогично. Формат, количество и порядок ввода данных совпадают с форматом из предыдущей программы ROSK. После заполнения данными поля при включенном режиме Add Data нажать клавишу «Добавить метеостанцию». Метеостанция с метеоданными добавится в рабочую базу.

Работа в режиме «Рассчитать для многих»

Программный модуль в режиме «Рассчитать для многих» разработан на основе методики для программы ROSK, эксплуатируемой с 2004 г. (в данном варианте он усовершенствован и расширен) (рис. 24).

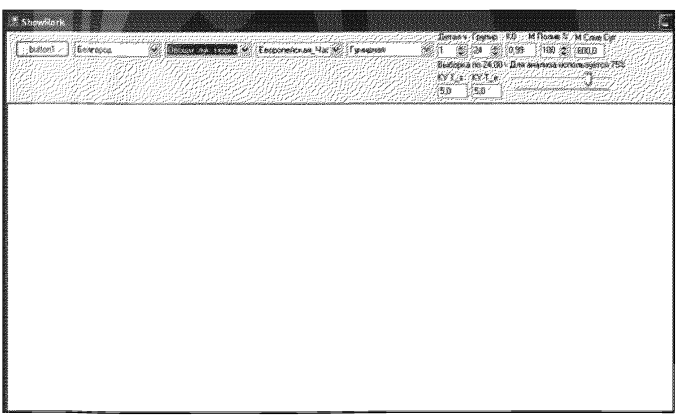


Рис. 24. Панель режима «Рассчитать для многих»

Расчет по программе осуществляется после нажатия кнопки button1, но предварительно необходимо установить правильную информацию в окнах следующим образом:

Первое окно – выбрать в ниспадающем меню название метеостанции, для которой проводится расчет. Если в предложенном меню метеостанция отсутствует – значит, ее нет в рабочей базе. Следует войти в режим программы **Add Data** и ввести метеостанцию согласно инструкции п.1);

Второе окно – выбрать название культуры для расчета. Если нужной культуры среди перечисленных нет, войти в режим программы **Add Data** и ввести культуру согласно инструкции;

Третье окно – назначить один из предложенных регионов: Европейская_Часть (BD OSN) или Сибирская_Часть (BD URAL) для выбора программой массива коэффициентов *Кб;*

Четвертое окно – выбор гумидной или аридной зоны для расчета динамики корнеобитаемого слоя *hк*.

Затем пользователем вводятся значения:

Детал ч – детализация расчета по временному промежутку (количество часов);

Групир – показатели усредняются с точностью до количества часов, указанных в окне;

К0 – микроклиматический коэффициент;

М Полив% – задается полив в % от максимального;

М Слив Сут – скорость ухода лишней воды с поля, мм в сутки (чтобы не учитывать этот параметр, следует задавать заведомо большее число, чем максимальная поливная норма).

Далее, ниже окон, выводится комментарий «Выборка по …», т.е. значение расчетного периода в часах: 24 – суточный, 240 – декадный и т.д.

В комментарии «Для анализа используется…%» – указать значение обеспеченности, выбранное пользователем с помощью предлагаемой шкалы: 25% – средневлажный, 50 – средний год, 75% – среднесухой и т.д.

Далее в окнах указываются (или уточняются) значения температуры начала и конца вегетационного периода (KY T_s и KY T_e соответственно), требуемые для вычисления интегрального показателя *Ку*.

Затем нужно проверить правильность заданных установок и запустить программу нажав кнопку *button1*.

Полученную в результате расчета информацию скопировать (Ctrl-A, Ctrl-Ins) и вставить (Shift-Ins) на чистый лист Excel для удобства чтения и печати.

Работа в режиме «Рассчитать сезон»

В режиме «Рассчитать сезон» для оперативного управления поливами (ОУП) осуществляется оперативный расчет влагозапасов почвы и дефицита водопотребления (рис. 25).

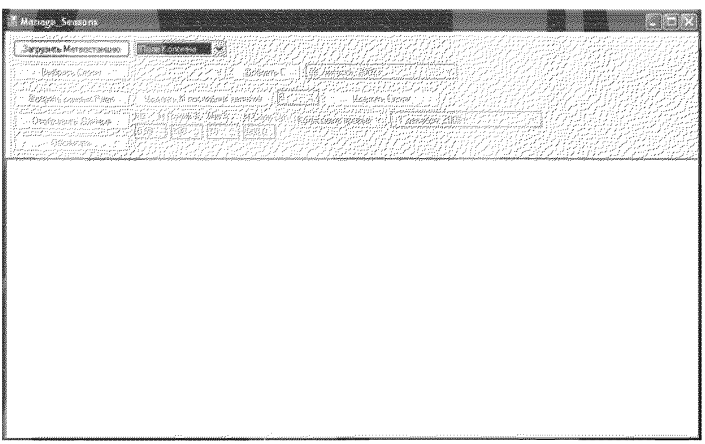


Рис. 25. Панель режима «Рассчитать сезон»

Работа в данном режиме для определенной сельскохозяйственной культуры всегда проводится с начала вегетационного периода. Последние несколько строк метеоданных могут представлять собой прогнозные значения на несколько суток вперед, которые при последующих расчетах заменяются фактическими.

В начале работы в первом верхнем окне из ниспадающего меню следует выбрать название метеостанции (или поля), для которой будет проводиться расчет. После выбора нужного названия нужно нажать соседнюю кнопку «Загрузить метеостанцию».

После этого на панели активизируется следующее окно, в него вводят дату начала сезона, которую подтверждают нажатием кнопки «Выбрать сезон».

Для ввода нового сезона (или изменения даты начала расчета) используется кнопка «Добавить С», нажатие которой позволяет исправить дату в соседнем (правом) окне.

После этого нажатием кнопки «Выбрать данные» загружают выбранную по сезону информацию из файла по метеостанции или вспомогательного файла.

Для расчета по оперативным и прогнозным данным, которые выбираются из вспомогательного файла, организованного по заданному формату (табл. 24), их следует скопировать, вставить в пустое рабочее окно, затем нажать кнопку «Выбрать данные».

Таблица 24

Последовательность расположения данных во вспомогательном файле

Временной промежуток	T	A	P	V	HF	AddP
24	11,65	68,7	0,3	0,9	12	0
24	9,45	81	4	1,6	12	0
24	9,85	77,1	0	1,1	12	0
24	11,45	70,3	0	0,9	12	0
24	15,85	61	0	1	12	0
24	16,25	67,2	0	1,6	12	0
24	13,45	71	0	1,75	12	0
24	13,55	72,3	10	3	12	0
24	15,85	82,9	2	1,9	12	0
24	12,55	71,5	6	3,25	12	0
24	12,25	69,2	0,3	1,6	12	0

Примечание. T – температура, A – влажность воздуха, P – осадки, V – скорость ветра, HF – высота флюгера, AddP – добавлено воды (полив, мм).

Нажатие кнопки «Выбрать сезон» активизирует следующее меню:

• «Отобразить данные» – в поле панели появится загруженная информация. Если требуется удалить несколько последних записей (например, прогнозную информацию), надо в окне рядом с кнопкой «Удалить N последних записей» указать нужное количество и подтвердить, нажав кнопку. После этого еще раз дать команду «Отобразить данные», чтобы убедиться в проведенной операции;

• задать:

К0 – микроклиматический коэффициент.

М Полив% – задается полив, в % от максимального.

М Слив Сут – скорость ухода лишней воды с поля, мм/сут (чтобы не учитывать этот параметр, следует задавать заведомо большее число, чем максимальная поливная норма).

Min % – минимальный допустимый порог влажности, с которого нужно начинать полив;

• выбрать культуру для расчета из предлагаемого перечня, содержащегося в рабочей базе программы;

• выбрать дату начала вегетации – указать в соседнем окне;

• нажать кнопку «Обсчитать». Результаты расчета скопировать на чистый лист Excel.

Строки с положительным дефицитом соответствуют дням, в которые необходим полив.

В прил. А3 представлен расчет сезона 2007 г. (май-сентябрь) по фактическим ежедневным метеоданным метеостанции Коломна для культуры люцерна прошлых лет. Условия расчета заданы пользователем и отражены на рабочей панели. Строки с положительным дефицитом соответствуют дням, в которые необходим полив.

Отрицательное значение дефицита говорит об излишках влаги (мм), образующих поверхностный сток.

При нулевом значении дефицита полив не нужен.

Работа в режиме «Аналитический раздел»

Построение сплайн-функции осуществляется по следующему алгоритму:

$$F(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t + a_{k1}\cos(tw_1) + a_{k2}\cos(tw_2) + a_{k3}\cos(tw_3) + \\ + b_{k1}\sin(tw_1) + b_{k2}\sin(tw_2) + b_{k3}\sin(tw_3).$$

1. Запустить программу «Raduga Irrigation».

2. Выбрать режим «Аналитический раздел».

Предварительно в Excel организовать ряды:

Год (начиная с нуля)	Значения показателя (например *Ку*)
0	0,51
1	1,1
2	0,9
3	….

4. Эти два столбца скопировать и вставить в поле окна «Аналитический раздел».

5. Заполнить предлагаемые окна первого ряда (напротив надписи Т1 (первый период): в первом окне – начальный год (это 0), во втором – конечный год (по числу лет наблюдений), в третьем – шаг расчета (наиболее целесообразно 0,5).

6. Нажать кнопку «1 период».

7. Полученные после расчета результаты скопировать на лист Excel.

8. Выбрать в скопированном массиве три строки с наименьшим значением в столбце Sigma*2. Соответственно выбрать три значения периода в соседнем столбце Т.

9. Вернуться в «Аналитический раздел». В окнах по строкам Т1, Т2 и Т3 указать соответственно границы каждого из трех периодов (± две единицы) и шаг расчета (тоже 0,5). В окно скопировать ряды (как в п. 3). Нажать кнопку «3 периода».

10. В полученных результатах, скопированных в Excel, найти строку с минимальным значением Sigma*2.

11. Коэффициенты соответствующей строки вставить в формулу и просчитать для всех значений показателя из п. 3.

12. По полученным результатам построить график сплайн-функции.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОЛИВА

Для рационального использования водных, земельных материально-технических и энергетических ресурсов большое значение имеет выбор технологий и техники орошения адаптированной к различным природным и хозяйственным условиям. При обосновании необходимо учитывать необходимость выполнения следующих экологических и экономических требований, предъявляемых к технологиям и техническим средствам полива:

• создание и поддержание оптимальной для роста и развития растений влажности почвы;

• сохранение структуры и физических свойств почвы;

• обеспечение активной деятельности микроорганизмов в почвообразовательном процессе и повышение плодородия почв;

• предотвращение процесса образования луж и поверхностного стока с целью исключения водной эрозии и переувлажнения почвы;

• рациональное использование тепловых и водных природных ресурсов;

• расчёт экологически безопасных поливных норм;

• внесение в почву с поливной водой минеральных и органических удобрений, микроэлементов, химических мелиорантов, гербицидов;

• предотвращение подъёма уровня грунтовых вод, образования верховодки и заболачивания почв, исключение потерь воды на глубинную фильтрацию;

• предотвращение подъёма солей в верхние горизонты почвы путем их выноса в дренажную сеть;

• рациональное использование интегральных ресурсов.

Таким образом, применение тех или иных способов орошения и технологий полива должно осуществляться с учётом конкретных природно-хозяйственных условий региона и наличия водных и земельных ресурсов, необходимых для получения устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур, сохранения и повышения плодородия земель.

Выбор способа и технологий орошения представляет собой сложную инженерно-экологическую задачу, для решения которой необходимо учитывать следующие факторы:

• почвенно-климатические условия (характер увлажнённости, температурный режим воздуха и почвы, водообеспеченность, испаряемость, ветровой режим, качество водоисточников, глубина залегания грунтовых вод и др.);

• выращиваемые сельскохозяйственные культуры (состав севооборота, характер развития растений, требования к режиму орошения, технология выращивания, урожайность);

• система ведения земледелия, механизация хозяйства, трудовые и энергетические ресурсы, другие организационные и хозяйственные условия.

В настоящее время в орошаемом земледелии применяются следующие способы орошения: поверхностный, дождевание, внутрипочвенный, капельный, аэрозольный (мелкодисперсное дождевание). В соответствии с принятой классификацией каждый способ имеет разновидности, определяемые способами подачи и распределения воды при поливе (рис. 26).

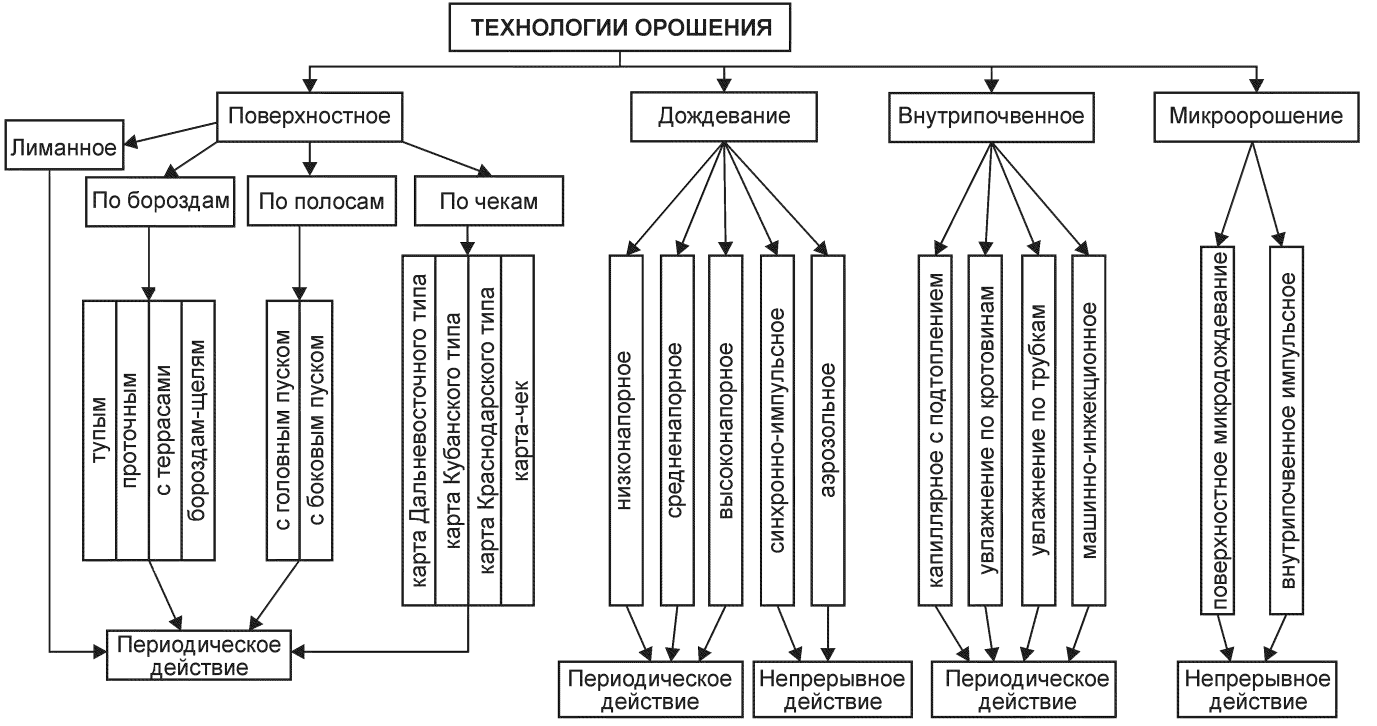


Рис. 26. Классификация способов орошения

В табл. 25 приведены примерные соотношения частей поливной нормы, идущих на увлажнение почвы и воздуха.

Таблица 25

Примерное соотношение частей поливной нормы, идущих в процессе орошения на восполнение запасов воды в почве и воздухе при малоинтенсивном орошении

Наименование способа и технологии водораспределения	Соотношение частей поливной нормы, идущих на восполнение запасов воды в почве (числитель) и воздухе (знаменатель)
Дождевание	0,15/0,88
Дождевание синхронно-импульсное	0,5-0,7/0,5-0,3
Дождевание мелкодисперсное (аэрозольное орошение)	0,02-0,05/0,98-0,95
Внутрипочвенное орошение (все технологии)	0,98/0,02
Капельное внутрипочвенное орошение	0,98/0,02

Для каждого способа орошения характерны особенности технологических процессов.

Технология дождевания

Самый распространённый способ механизированного полива – дождевание. При строгом соблюдении технологии этот способ орошения не сопровождается заболачиванием и засолением почвы, обеспечивает высокую равномерность распределения воды. При таком способе полива не требуется тщательная планировка поля, одновременно с дождеванием можно вносить средства химизации, увлажнять приземный слой воздуха, что положительно сказывается на росте и развитии растений.

В настоящее время широкое распространение получил полив высокопроизводительными широкозахватными дождевальными машинами типа «Фрегат», «Кубань-К», предназначенными для полива всех сельскохозяйственных культур, включая высокостебельные и используемыми на любых типах почв. Технические характеристики дождевальных машин обеспечивают экологически безопасное ресурсосберегающее орошение сельскохозяйственных куль-

тур, т.е. допустимая интенсивность дождя (без стока и образования луж при заданной поливной норме) составляет: для тяжёлых почв – 0,1-0,2 мм/мин, средних – 0,2-0,3, лёгких – 0,5-0,8 мм/мин.

К особенностям орошения такими машинами относится необходимость обеспечения равномерного слоя дождя по длине водопроводящего трубопровода. При этом интенсивность полива должна быть согласована с впитывающей способностью почвы таким образом, чтобы полив не сопровождался образованием стока воды и другими негативными последствиями.

Данная технология дает возможность создать контролируемые условия влагосодержания, повысить степень полезного использования естественных осадков, их аккумуляцию в верхних, почвенных горизонтах.

Технология дождевания с низкой интенсивностью осадков реализуется на малорасходных модификациях дождевальных машин, работающих в движении, а также на стационарных дождевальных системах прерывистого и импульсного дождевания.

Система дождевальных машин и установок для небольших фермерских участков обеспечивает возможность дождевания с низкой интенсивностью слоем до 10 мм. К разработкам данного класса относится комплект ирригационный с переносными крыльями КИ-5, который предназначен для поливов технических, кормовых, овощных и бахчевых культур, сенокосов и пастбищ на торфяных, песчаных и среднесуглинистых почвах на площади 5 га.

Внедрение технологий дождевания низкой интенсивности обеспечивает экологически безопасное орошение и имеет ряд преимуществ: низкие стоимость и эксплуатационные затраты, высокие надежность и мобильность оборудования, непрерывное обеспечение растений водой в соответствии с их водопотреблением, двойное регулирование влагозапасов в почве, многоцелевое использование мелиоративных систем, в том числе с внесением вместе с поливной водой удобрений и мелиорирующих веществ.

Технология микроорошения заключается в подаче воды в соответствии с водопотреблением культуры. Режим подачи воды зависит от нормы, сроков и продолжительности поливов за оросительный период, зоны увлажнения, расхода и числа капельниц, схемы их расположения и водно-физических свойств почвы.

Поливная норма, $м^3$/га:

$$m_{nt}=100\cdot\gamma\cdot h\cdot A_{nt}(W_{FC}-W_{PW}),$$

где γ – объёмная масса почвы, $т/м^3$;

h – глубина расчётного слоя почвы, м;

A_{nt} – площадь увлажнения, $м^2$;

W_{FC} – наименьшая влагоёмкость от массы абсолютно сухой почвы, %;

W_{PW} – предполивная влажность почвы, соответствующая нижней границе оптимального увлажнения почвы, доли единиц.

Продолжительность водоподачи, ч:

$$t_{adm}=m_{nt}/(E_f\cdot g_{dr}\cdot n),$$

где E_f – коэффициент использования воды (0,96-0,98);

g_{dr} – расход капельницы, л/ч;

n – число капельниц на 1 га.

Очаг увлажнения в соответствии с агробиологическими показателями сельскохозяйственных культур и водно-физическими свойствами почвы формируется в зависимости от расхода микроводовыпусков и продолжительности полива.

При *капельном орошении*, вода из водовыпусков подаётся в виде капель или мелких струек в одну точку, увлажнение почвы осуществляется в зоне максимального развития корневой системы. Применяется на землях с уклонами до 0,35 при давлении в сети 0,1-0,4 МПа и расходе капельницы 2-6 л/ч. Капельное орошение (низконапорное) обеспечивает подачу воды в виде капель расходом 4-20 л/ч на ровном пологом рельефе с уклоном от 0,03° до 0,35°. Этот способ позволяет поддерживать в почве благоприятный водно-воздушный режим без поверхностного и глубинного сбросов оросительной воды. Необходимое увлажнение почвы в сочетании с внесением минеральных удобрений в течение вегетационного периода обеспечивает получение планируемых урожаев овощей [56].

Внутрипочвенное орошение (ВПО) – способ, при котором воду подают из различных увлажнителей, прокладываемых в почве на глубине 40-60 см от поверхности земли. А.Н. Костяков относил к этому способу орошения искусственное поднятие уровня грунтовых вод (субирригация).

Для данного способа орошения необходимы почвы с хорошо выраженными капиллярными свойствами и маловодопроницаемые

подпочвы. К преимуществам этого орошения относятся: высокий коэффициент земельного использования (0,98-0,9), снижение водопотребления на 15-40%, увеличение урожайности на 20-40%, возможность проведения круглосуточных поливов.

Единичная поливная норма рассчитывается из условия создания в почвогрунте контура увлажнения расчётных параметров в пределах единицы увлажнителя (л на 1 м увлажнителя) [53].

Поливная норма, $м^3$/га:

$$m=0,65hB(W_{FC}-W_o)l/n,$$

где l – длина увлажнителя, м;

n – число увлажнителей на 1 га, которое зависит от длины увлажнителя и средней ширины полосы увлажнения B;

l, h, B – параметры контуров увлажнения в зависимости от механического состава почв.

Продолжительность полива, ч:

$$t=r_W/\sum_1^i V_i,$$

где r_W – условный слой воды, необходимый для насыщения элементарной почвенной колонки расчётной глубины, м;

$\sum_1^i V_i$ – средняя скорость впитывания воды почвогрунтом (за период от 1 до 12 ч), м/ч.

По способу поступления воды в почву ВПО подразделяется на напорное, безнапорное и вакуумное. Проектируются системы ВПО на участках со спокойным микрорельефом; по длине увлажнителей допускаются обратные уклоны с превышением на 5-10 см.

Несмотря на сложность строительства систем внутрипочвенного орошения, они имеют наибольший КПД по сравнению с дождеванием и поверхностным поливом.

В условиях роста дефицита водных и стоимости энергетических ресурсов наибольшую перспективу имеют технологии и техника орошения, обеспечивающие снижение энергоемкости, затрат антропогенных ресурсов и экологическую безопасность (табл. 26, 27).

Таблица 26

Экологически допустимые границы применимости серийной дождевальной техники

Наименование вида ирригационного оборудования	Дефицит водного баланса, мб	Скорость ветра, м/с	Средняя скорость впитывания в течение первого часа, мм/ч	Глубина залегания подстилающего почву слоя, м	Глубина залегания минерализованных вод, м	Максимальный уклон местности	Необходимый объем работ, $м^3$/га	Способность почвы, кПа
Среднеструйные дождевальные установки. Показатели определены по переносной установке КИ-50	1-3	До 5	15-30	Более 0,5	Более 2	0-0,1	До 800	60
Двухконсольные короткоструйные дождевальные машины с забором воды на открытом оросителе. Показатели определены по ДДА-100МА	1-5	До 5	10-30	Более 1,5	Более 2	0,001-0,004	До 800	60
Многоопорная электрифицированная дождевальная машина с короткоструйными насадками, работающая в движении из открытой сети	3-6	До 6	5-30	Более 0,5	Более 2	0-0,01	До 400	60
Широкозахватные среднеструйные дождевальные машины позиционного действия. Показатели определены по «Волжанке»	1,5-5	До 7	5-30	Более 0,5	Более 2	0-0,02	До 500	20
Широкозахватные среднеструйные дождевальные машины, работающие по кругу. Показатели определены по дождевальной машине «Фрегат»	1,5-5	До 8	5-30	Более 0,5	Более 2	0-0,03	До 500	160

Продолжение табл. 26

Наименование вида ирригационного оборудования	Дефицит водного баланса, мб	Скорость ветра, м/с	Средняя скорость впитывания в течение первого часа, мм/ч	Глубина залегания подстилающего почву слоя, м	Глубина залегания минерализованных вод, м	Максимальный уклон местности	Необходимый объем работ, $м^3$/га	Способность почвы, кПа
Дальнеструйные машины с забором воды из водоемов Показатели определены по дождевальной машине ДДН-70,100, 150	1-4	До 5	15-30	Более 1,0	Более 2	0,001-0,007	До 300	100
Самоходные шланговые дождеватели среднеструйные, работающие в движении	1,5-5	До 5	5-80	Более 0,5	Более 2	0-0,05	До 400	70
Стационарные системы и стационарные комплекты СИД	1,5-5	До 5	1-30	Более 0,3	Более 2	0-0,3	До 3000	200

Таблица 27

Экологически допустимые границы применимости серийной и перспективной дождевальной техники для фермерских хозяйств

Наименование вида ирригационного оборудования, поливного устройства, характеристика технологического процесса	Коэффициент естественной природной увлажненности/суточный расход влаги, $м^3$/га	Водопроницаемость почвы, см/ч	Глубина залегания грунтовых вод, м (пресных/минерализованных)	Глубина залегания подстилающего почву слоя, м	Максимальный уклон поверхности участка	Показатель выровненности поверхности участка, $м^3$/га
Перспективные дождевальные установки с дефлекторными, целевыми насадками и забором воды из трубчатой сети (установка «Радуга»)	Более 0,3 30-60	1-30	Более 1 Более 2	Более 0,5	0-0,05	Менее 400
Дождевальные установки со среднеструйными аппаратами и забором воды из трубчатой сети («Россиянка»)	Более 0,3 30-60	1-30	Более 1 Более 2	Более 0,3	0-0,05	Менее 400
Перспективный шланговый дождеватель позиционного действия с забором воды из трубчатой сети или водонапорной системы («Кооператор»)	Более 0,3 30-60	1-30	Более 1 Более 2	Более 0,5	0-0,1	Менее 400
Шланговый дождеватель, работающий в движении с забором воды из трубчатой сети или бытового насоса	Более 0,3 30-60	1-30	Более 1 Более 2	Более 0,3	0-0,05	Менее 400

Продолжение табл. 27

Наименование вида ирригационного оборудования, поливного устройства, характеристика технологического процесса	Коэффициент естественной природной увлажненности/суточный расход влаги, $м^3$/га	Водопроницаемость почвы, см/ч	Глубина залегания грунтовых вод, м (пресных/минерализованных)	Глубина залегания подстилающего почву слоя, м	Максимальный уклон поверхности участка	Показатель выровненности поверхности участка, $м^3$/га
Дождеватель импульсного действия, работающий в движении с забором воды из трубчатой сети (ДШИ-3)	Более 0,3 30-60	1-30	Более 1 Более 2	Более 0,3	0-0,05	Менее 1000
Перемещаемый дождевальный шлейф импульсного действия с забором воды из трубчатой сети (шлейф с дождевальной тягой «Роса-3»)	Более 0,3 30-80	1-30	Более 1 Более 2	Более 0,3	0-0,1	Менее 400
Дождевальная однопролетная машина кругового действия с забором воды из трубчатой сети («Карусель», «Мини-Карусель-К»)	Более 0,3 30-80	5-30	Более 1 Более 2	Более 0,5	0-0,03	Менее 500
Дождевальная многопролетная машина кругового действия с забором воды из трубчатой сети («Фермер-Кубань-ЛК-1», «Фермер-Фрегат»)	Более 0,3 30-80	5-30	Более 1 Более 2	Более 0,5	0-0,02	Менее 400

Дождевальная машина фронтального действия, работающая в движении с забором воды из перемещаемого шланга, питающегося от трубопроводной сети («Мини-Кубань-ЛК», «Мини-Фрегат-ФШ»)	Более 0,3 30-80	5-30	Более 1 Более 2	Более 0,5	0-0,03	Менее 500
Дождевальный колесный трубопровод позиционного действия с забором воды из гидрантов трубчатой сети (ТКА-24)	Более 0,3 30-80	5-20	Более 1 Более 2	Более 0,5	0-0,02	Менее 400
Стационарно-сезонный комплект медленного, в том числе противозаморозкового дождевания	Более 0,3 30-60	5-20	Более 1 Более 2	Более 0,3	0-0,1	Менее 1000
Стационарная система прерывистого дождевания с гидроавтоматическим управлением (ДАУ-30)	Более 0,3 30-80	10-30	Более 1 Более 2	Более 1,0	0-0,05	Менее 400
Стационарная система мелкодисперсного дождевания с забором воды из трубчатой сети	Более 0,3 20-60	0,1-25	Более 0,5 Более 1	Более 0,3	0-0,3	Менее 3000

7. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Программирование урожаев предполагает расчет урожайности по заранее составленной программе с учетом физико-географических, почвенно-агрометеорологических условий и биологических особенностей растений.

Программирование урожаев – сложный процесс, включающий в себя ряд этапов построения и использования математических моделей для решения задач оптимизации и программирования урожайности: максимальной – по приходу солнечной энергии, оптимально возможной – по биоклиматическим показателям продуктивности земли и возможной – по влагообеспеченности посевов и использованию ими влаги в течение вегетационного периода.

Первые попытки использования свойств инерционных природных процессов, применения способов типизации погоды, «года-аналога», динамической модели «погода-урожай» с целью оптимизации минерального питания растений в зависимости от погодных условий вегетационного периода были сделаны А.Р. Константиновым, Х.А. Тоомингом, О.Д. Сиротенко в 70–90-х годах XX столетия.

В течение двух последних десятилетий наблюдается значительный прогресс в развитии моделей расчета для установления связи в системе «климат-почва-урожай». Представляет интерес разработанная во ВНИИ сельскохозяйственной метеорологии (О.Д. Сиротенко и др.) [41] имитационная система климат-урожай и некоторые результаты ее использования.

Основные компоненты системы: комплекс имитационных моделей, информационный фонд, пакет программ для построения годовых климатических сценариев, системное обеспечение.

Основой имитационной системы «климат-урожай» служит разработанная О.Д. Сиротенко прикладная динамическая модель энергомассообмена и продуктивности агроэкосистем. Модель представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений,

интегрируемых численно с суточным шагом по времени в течение вегетационного периода соответствующей культуры. Модель делится на три взаимосвязанных блока, в каждом из которых решается соответствующая подсистема уравнений для расчета:

динамики фитомассы агробиоценоза отдельных органов растений в результате моделирования процессов фотосинтеза, дыхания, роста, развития и старения;

динамики влагозапасов почвы в результате моделирования процессов инфильтрации, испарения, транспирации и корневого поглощения воды;

динамики минерального азота почвы путем моделирования процессов нитрификации, денитрификации, корневого поглощения и вымывания.

Информационный фонд системы составляют ежегодно пополняемые месячные данные по температуре и осадкам за последние 100 лет, усредненные по административным областям и приравненным к ним территориальным единицам. Дополнительно для настройки и проверки моделей используется массив суточных гидрометеорологических данных за пять лет. Информационный фонд содержит характеристики агрофизических и агрохимических свойств почв, а также среднеобластную урожайную статистику для зерновых культур за послевоенный период.

Сценарии будущих состояний климата содержат, как правило, информацию об изменениях месячных значений температуры и осадков. Кроме того, основной столетний массив метеорологических данных тоже содержит лишь месячные значения температуры и осадков. Создана стохастическая модель, позволяющая с помощью метода Монте-Карло генерировать ансамбль годовых реализаций суточных комплексов метеорологических элементов, соответствующих заданным месячным значениям. Для восстановления исходных осредненных значений солнечной радиации и влажности воздуха использованы статистические связи этих величин с температурой и осадками. Разработана также методика восстановления для каждого года начальных значений (на дату возобновления вегетации) влагозапасов почвы и содержания в ней доступных форм азота.

Разработанная система «климат-урожай» впервые позволила соединить массивы гидрометеорологических, агрономических дан-

ных и характеристик почв, охватывающих всю страну, с мощной интерпретирующей системой в виде комплекса моделей энергомассообмена и продуктивности важнейших сельскохозяйственных культур. Важнейшая выявленная закономерность – наличие двух периодов роста климатически обусловленной урожайности – в начале XX века (с максимумом в 1910-1920 гг.) и в настоящее время. Последний минимум в вековом ходе урожайности пришелся на годы, близкие к 1960 г., после чего началось устойчивое и четко выраженное улучшение условий произрастания зерновых культур.

Оценив современный почвенно-климатический потенциал страны, можно ответить и на вопрос о его возможной трансформации под воздействием глобального потепления. Результаты расчетов ожидаемых изменений продуктивности для двух палеоклиматических аналогов глобального потепления – климатических оптимумов голоцена (ОГ) и микулинского межледниковья (ОММ) – позволяют сделать вывод, что эволюция климата по двум этим сценариям в целом благоприятна для сельского хозяйства. В качестве показателя продуктивности взята не урожайность конкретной сельскохозяйственной культуры, а суммарная продуктивность сухой надземной биомассы травяной агроэкосистемы за период года с температурой выше 5°С, названная биоклиматическим потенциалом (БКП) по Д.И. Шашко [49].

Предлагается рассмотреть интересное решение проблемы выработки оптимального режима для роста продуктивности пашни в Центре агрохимической службы «Нижегородский» [48]. Выбран комплексный математический метод моделирования взаимосвязи урожайности сельскохозяйственных культур с агрохимическими параметрами плодородия почв и климатическими условиями. Модельная система связывает выходной параметр (функцию отклика) – урожайность озимой и яровой пшеницы, озимой ржи и ячменя – с четырьмя основными почвенными факторами (содержание гумуса, подвижного фосфора, обменного калия, pH) и двумя климатическими факторами (ГТК Г.Т. Селянинова [40] и сумма положительных (более 10°С) температур).

В комплексном статистико-стохастическом моделировании использовали мультипликативную регрессионную модель зависимости функции отклика от факторов регрессии. Коэффициенты регрессии нелинейного мультипликативного уравнения прогноза оп-

ределяют по сложному алгоритму, включающему в себя формирование матрицы входных данных, столбца выходного параметра, транспонирование, обращение матрицы, перемножение транспонированной, а затем и обращенной матрицы на столбец выходных данных (урожайность) и т.д.

По предварительному регрессионному мультипликативному уравнению оценивали грубые погрешности в базе данных, по которым относительная ошибка прогноза превышала 20%. Экспериментальные значения урожайности на таких участках («выбросы») заменяли теоретическими значениями прогноза. По исправленной базе данных урожайности (столбец выходного параметра) и неизменной матрице шести входных факторов формировали основное регрессионное нелинейное мультипликативное уравнение прогноза.

Полученное уравнение может быть использовано для оценки «неоднородности» всей технологии, определения «функций влияния» каждого входного фактора на урожайность и задания «коридоров» входных факторов под программируемый урожай.

В соответствии с реальными параметрами средних значений и средних квадратичных отклонений входных факторов формировался двумерный массив 6×300, где 6 – индекс факторов, 300 – индекс числа реализаций компьютерно-технологических «опытов» по методу Монте-Карло на базе основного уравнения. Если одновременно менялись все шесть факторов, то коэффициент вариации функции отклика характеризовал «неоднородность» всей технологии. Если же пять факторов закреплялись на среднем уровне, а вместо шестого фактора в уравнение вводили элементы массива, то коэффициент вариации функции отклика характеризовал влияние каждого входного фактора на урожайность.

По данным 14 реперных участков, рассчитанная «неоднородность» технологии равнялась 35%. Самыми важными факторами для зерновых на дерново-подзолистых почвах являются содержание обменного калия (32,5%) и кислотность почвы (36,5%).

Программирование урожайности зерновых осуществлялось следующим способом: по заданному значению урожайности и полученной при компьютерных реализациях методом Монте-Карло его погрешности определяются средние значения и средние квадратические отклонения входных факторов, которые обеспечивают запрограммированный уровень урожайности.

Таким образом, статистико-стохастическое моделирование позволяет получать точные (математически строгие) нелинейные мультипликативные регрессионные уравнения и открывает путь к решению многих практических задач на базе данных реперных участков и полевых опытов:

• оценивать достоверность исходной информации, качество (уровень плодородия) почв;

• определять степень влияния каждого фактора на урожайность сельскохозяйственных культур, интервалы входных факторов под программированную продуктивность каждого поля;

• прогнозировать и программировать на компьютере возможные для данных условий уровни урожайности сельскохозяйственных культур;

• изучать физиологические особенности влияния почвенных факторов на продуктивность агрокультур;

• разрабатывать методологию экономической оптимизации внесения органических и минеральных удобрений.

Введение в сельскохозяйственное производство адаптивно-ландшафтной системы земледелия предполагает использование программирования урожаев как оценочного показателя почвенно-климатических ресурсов территории. Это важнейший путь рационального применения на практике основных законов земледелия и повышения КПД использования солнечной энергии.

Для приближенной оценки максимальной или *потенциальной* урожайности (ПУ) может использоваться формула А.А. Нечипоровича [30], связывающая потенциальную урожайность с солнечной радиацией:

$$У_{биол} = \frac{10^9 \cdot R \cdot K}{10^2 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^2},$$

где $У_{биол}$ – биологический урожай абсолютно сухой растительной массы, ц/га;

$10^9 \cdot R$ – количество приходящей ФАР за период вегетации культуры в данной зоне, млрд ккал/га;

K – запланированный коэффициент использования ФАР, %;

10^2 – *100%;* $4 \cdot 10^3$ – количество энергии, выделяемое при сжигании 1 кг сухого вещества биомассы, ккал/кг;

10^2 – коэффициент перевода кг в ц.

Например, посевами яровой пшеницы запрограммировано усвоить 2% ФАР. За период вегетации на посевы пшеницы приходится около 2 млрд ккал/га. Подставив эти величины в формулу, определяем, что в этих условиях может быть получено 100 ц/га сухого вещества яровой пшеницы:

$$У = \frac{2 \cdot 10^9 \cdot 2\%}{100\% \cdot 4000 \cdot 10^2} = 100 \text{ ц/га}.$$

При этом для обеспечения посевам высокого КПД ФАР необходимо соблюдать агротехнические требования по выращиванию сельскохозяйственных культур.

Солнечное тепло, влага и почвенные условия составляют единый комплекс, математическое выражение которого объединено в формуле А.М. Рябчикова [38], что позволяет с высокой точностью определить продуктивность *оптимально возможной* фитомассы:

$$K_P = -\frac{W \cdot T_V}{36 \cdot R},$$

где K_P – биогидротермический потенциал продуктивности, баллы;

W – продуктивная влага (среднегодовое количество осадков P минус сток S), мм;

T_V – период вегетации, декады;

36 – число декад в году;

R – радиационный баланс за этот период, ккал/см^2.

Эта формула включает в себя приход интегральной радиации, непосредственно влияющей на испарение воды с поверхности почвы и растений. Для расчетов в формулу обычно вводят только продуктивную влагу, которую растения используют на образование сухой биомассы.

Биоклиматический потенциал продуктивности (*БКП*) земли определяют по формуле Д.И. Шашко [49].

Биоклиматический потенциал (*БКП*) – основной показатель урожайности – рассчитывается по формуле

$$БКП = K_p \cdot \frac{\sum t}{1000},$$

где $K_p = 1{,}15\lg(20M_d) - 0{,}21 + 0{,}63M_d - M_d^2$;

$$M_d = \frac{P}{\sum d};$$

$$d = l_a(1\text{-}a/100).$$

Здесь Σt – сумма температур воздуха ≥10°С или ≥5°С в зависимости от лимитных температур конкретной культуры; P – сумма осадков за рассматриваемый период, мм; d – дефицит влажности воздуха, мб; a – относительная влажность воздуха, %; l_a – упругость насыщенного пара, мб.

Размеры потенциальной биологической продуктивности можно перевести в величины урожая тех или иных культур по условию

$$m = \frac{K_n}{K_p} \cdot БКП \cdot 10,$$

где K_n – коэффициент продуктивности культур (урожай на 100° сумм температур) по эмпирическим данным.

По последнему условию может быть вычислена и продуктивность конкретной культуры, если величины *БКП* будут определены по суммам температур за ее вегетационный период.

Следует отметить, что влияние климата на продуктивность растений преломляется через почву. Поэтому к установленным баллам его продуктивного значения, или относительным величинам *БКП*, требуется поправка на качество почвы. Такой исправленный балл будет характеризовать уже бонитет почвы на фоне определенных климатических условий.

Биоклиматический потенциал территории обусловливает зональный тип специализации сельского хозяйства, системы земледелия и другие особенности сельскохозяйственного производства.

Теоретически возможные урожайности растений в зависимости от содержания влаги в почве и количества выпадающих атмосферных осадков за вегетационный период можно вычислять по формуле И.В. Цыганова [19]. Модель удобна для расчетов, число параметров достаточно информативно. Расчет урожайности (по Цыганову):

$$ВУ_{т/га} = \frac{(НВ - ВЗ) + (0{,}5 \cdot P \cdot 10)}{ТК} \cdot K,$$

где $ВУ_{т/га}$ – вероятностная теоретическая урожайность;

НВ – весенний запас воды при наименьшей влагоемкости в метровом слое почвы, т/га;

ВЗ – запас воды при влажности завядания в метровом слое почвы, т/га;

Р – среднемноголетние осадки, мм;

0,5 – коэффициент полезности летних осадков;

10 – переводной коэффициент, мм в т/га;

ТК – транспирационный коэффициент, т/га;

К – коэффициент отношения основной продукции к побочной.

Например, для условий Черноземья при весеннем запасе воды в метровом слое почвы, равном 3000 т/га, влажности завядания в этом же слое – 1200 т/га, средних многолетних осадках за время вегетации ячменя, равных 250 мм, транспирационном коэффициенте ячменя, равном 534, и отношении зерна к соломе как 1:2, урожайность ячменя составит:

$$ВУ = \frac{(3000-1200)+(250\cdot 0,5\cdot 10)}{534}\cdot\frac{1}{2} = 2,85 \text{ т/га.}$$

Следует отметить, что частая причина разрыва между теоретически возможными и практическими урожаями заключается в низком уровне плодородия почв, качестве посевного материала и нарушении агротехнических требований возделывания сельскохозяйственных культур.

Одним из возможных вариантов прогноза урожайности может служить модель В.Г. Сычева [44], которая реализуется по следующим принципам.

Продуктивность сельскохозяйственных растений зависит от биологических особенностей, плодородия почв, агротехники и метеорологических условий. Чтобы принять решение об изменении структуры посевных площадей и перераспределении ресурсов хозяйства, необходимо знать, какой урожай дает та или иная культура в конкретных, меняющихся, погодных условиях определенного года. Имея такой прогноз, можно решать вопросы о структуре посевов (выборе сорта, норме высева семян, дозах удобрений и т.п.) и с учетом особенностей года активно влиять на величину урожая. Решение перечисленных задач зависит от заблаговременности поступающих сведений, хотя бы за месяц до начала сева. Однако составлять прогноз урожайности в соответствии с метеопрогнозом нецелесообразно. Разумнее, используя метеоданные, непосредственно установить их связь с урожайностью и другими характери-

стиками. Автором предложена имитационная модель прогноза корректировки площадей (на основе прогноза урожая) культур для определенного года по следующей схеме. Создается банк данных, содержащий статистические материалы, опытные данные Географической сети и Гидрометеослужбы. Переменные величины: большое число показателей температуры воздуха, количества осадков, запасов влаги в почве; содержание элементов питания: нитратного азота, подвижных форм калия и фосфора, вынос элементов питания, коэффициенты использования азота, фосфора, калия из удобрений и при естественном плодородии; химический состав растений; уровень агротехники, севооборот, сорт.

Функцией служит урожай, например, озимой пшеницы или картофеля. Были получены матрицы коэффициентов корреляции между названными выше показателями и урожаями, отобраны факторы, наиболее тесно связанные с урожаем. Все они были разделены на две группы в зависимости от коэффициентов корреляции:

первая – $r < 0{,}45$; вторая – $r > 0{,}45$.

Для каждой группы в каждом году определяется интегральный показатель:

$$И = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{a_i}{\delta_i},$$

где a_i – фактор, входящий в данную группу;

δ_i – среднее квадратичное отклонение i-го фактора;

n – число факторов в группе.

Интегральные показатели группировали, создавая годы-аналоги. Чтобы данные разных лет были сравнимы между собой, факторы были представлены в долях к предыдущему или последующему году (относительные величины). Полученные результаты показали интересные закономерности. Например, в год, предшествующий «зерновому году», коэффициенты использования элементов питания были выше, чем в остальные годы, изменился также химический состав растений. Принято считать, что коэффициенты использования зерновыми культурами NPK минеральных удобрений в среднем для азота равны 60%, фосфора – 20, калия – 70%, а в последействии соответственно 10, 15 и 10%. Однако колебания коэффициентов использования элементов питания для азота составляют 30-85%, фосфора – 20-35, калия – 30-75%. Из почвы зерновые

культуры могут усвоить 20% азота, 5 – фосфора и 20% калия, хотя крайние значения этих коэффициентов также сильно изменяются в зависимости от сельскохозяйственных культур, сорта, агротехники, почвенных и погодных условий и, как показали результаты анализа, они могут служить характеристикой прогноза. Описанная схема позволяет допустить возможность прогноза урожайности культуры по годам. Вопрос в том, какие переменные факторы лучше выбрать, какой математический аппарат применить – еще предстоит решать. На данном этапе предложенную схему расчетного прогноза по годам-аналогам следует рассматривать как эксперимент и развивать его в этом направлении.

Методика установления зависимости урожайности от уровня водообеспеченности сельскохозяйственных культур. Анализ экспериментальных данных (в том числе и многочисленных зарубежных данных) зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от уровня водообеспеченности свидетельствует о том, что влияние относительного снижения водообеспеченности растений на относительное снижение их урожайности не носит зонального характера, т.е. не имеет территориальной изменчивости.

Наиболее полная по количеству и качеству статистика имеется по связям между урожайностью и суммарным водопотреблением сельскохозяйственных культур.

Зависимость снижения урожайности сельскохозяйственных культур от уровня их водообеспечения для случая равномерного в течение вегетации накопления дефицита воды в обобщенном виде формализуется параболической кривой [56].

В относительных единицах измерения аналитическая зависимость имеет следующий вид:

$$\Delta y_i = A + B \cdot \Delta \ell_{vi} + C \cdot \Delta \ell_{vi}^2,$$

где ΔYi – относительное снижение урожайности в долях от расчетной (максимальной, плановой, проектной);

$\Delta \ell_{vi}$ – относительное снижение водообеспечения (фактического водопотребления) культуры в долях от E_{vonm}.

Элементы уравнения (18) определяются следующим образом:

$$\Delta \ell_{vi} = 1 - \frac{E_{vi}}{E_{vonm}},$$

где E_{vonm} – оптимальное водопотребление (эвапотранспирация) при оптимальном уровне водообеспечения растений, мм или м³/га;

$$\Delta У_i = 1 - \frac{У_i}{У_p},$$

Evi – водопотребление при фактическом водообеспечении растений, мм или м³/га;

$У_p$ – урожайность при оптимальном водообеспечении растений и реализуемом уровне агротехники, ц/га или т/га;

$У_i$ – фактическая урожайность культуры при дефицитном водообеспечении растений, ц/га или т/га.

Следует отметить, что оптимальное водопотребление E_{vonm} наблюдается при поддержании запасов влаги в почве в пределах от НВ (наименьшей влагоемкости) до некоторой критической влажности, соответствующей ВРК (влажности разрыва капиллярных связей).

Для орошаемых почв критическая влажность почвы $\beta_{кр}$ ориентировочно равна:

$$\beta_{\text{кр}} = 0,5\left(\beta_{\text{НВ}} + \beta_{\text{З}}\right),$$

где $\beta_{\text{НВ}}$ – влажность почвы, соответствующая наименьшей влагоемкости, % от массы;

$\beta_{\text{З}}$– влажность завядания, % от массы.

В настоящей работе $\beta_{кр}$ (порог допустимого иссушения почвы) определяется по формуле

$$\beta_{\text{кр}} = 0,3614 + 1,476^{-3} \cdot W_{\text{НВ}} \text{-} 9.524 \cdot 10^{-7} \cdot W^2_{\text{НВ}},$$

где W_{HB} – наименьшая влагоемкость почвы, мм.

При снижении влажности почвы ниже критической водообеспечение растений ухудшается, в соответствии с чем снижается их урожайность.

Принятое в расчетах оптимальное водопотребление Ev_{onm} соответствует условиям поддержания запаса влаги в корнеобитаемом слое почвы в пределах от НВ (наименьшей влагоемкости) до некоторой критической влажности, соответствующей ВРК (влажности разрыва капиллярных связей).

Относительное снижение урожайности (ОСУР) $\Delta У_i$ определяется по уравнениям связи. Различия между установленными зависимостями, которые приводятся в работах отечественных и зарубежных авторов, объясняются прежде всего количеством и качеством

использованных экспериментальных и статистических данных (табл. 28).

Для составления уравнений связи урожайности с оросительной нормой также приняты эмпирические уравнения параболы. При этом суммарный дефицит оптимального водопотребления принимается равным оптимальной оросительной норме.

Таблица 28

Уравнения связи относительного снижения урожайности $\Delta У_i$ в зависимости от снижения природной водообеспеченности $\Delta \ell_{vi}$ некоторых сельскохозяйственных культур для условий ЦФО

Культура	Уравнения связи $\Delta Yi = f(\Delta \ell_{vi})$
Яровая пшеница	$\Delta Yi = -0{,}003 + 0{,}63\Delta \ell_{vi} + 0{,}77\Delta \ell_{vi}^2$
Люцерна на сено	$\Delta Yi = -0{,}002 + 0{,}33\Delta \ell_{vi} + 1{,}07\Delta \ell_{vi}^2$
Сахарная свекла	$\Delta Yi = -0{,}0019 + 0{,}45\Delta \ell_{vi} + 0{,}75\Delta \ell_{vi}^2$
Кукуруза на силос	$\Delta Yi = -0{,}026 + 0{,}64\Delta \ell_{vi} + 0{,}86\Delta \ell_{vi}^2$
Капуста поздняя	$\Delta Yi = -0{,}024 + 1{,}08\Delta \ell_{vi} + 0{,}36\Delta \ell_{vi}^2$
Картофель поздний	$\Delta Yi = -0.025 + 0{,}91\Delta \ell_{vi} + 0{,}45\Delta \ell_{vi}^2$

Используя приведенные в табл. 28 уравнения связи $\Delta Yi = f(\Delta \ell_{vi})$, можно установить относительные и абсолютные значения снижения урожайности от недостатка водообеспечения остальных сельскохозяйственных культур, возделываемых в регионе.

Пример расчета 1. Относительное снижение урожайности в зависимости от природной водообеспеченности люцерны на сено

Зона	Год		Суммарное водопотребление, мм	Оросительная норма, мм	Природная влагообеспеченность, мм	Относительный недостаток природной влаги	Коэффициент снижения урожайности	Фактическое снижение, ц/га	Урожайность, ц/га
Лесостепная	Среднеувлажный	P=25%	490	140	350	0,25	0,15	13,5	76,5
	Средний	P=50%	510	180	330	0,32	0,22	19,4	70,6
	Среднесухой	P=75%	560	250	310	0,45	0,36	32,6	57,4
	Сухой	P=95%	610	350	260	0,55	0,51	45,8	44,2

Если E_{vonm} – оптимальное водопотребление культуры за вегетационный период, ΔE_v – дефицит водопотребления (оросительная норма), то природная водообеспеченность $E_v = E_{vonm} - \Delta E_v$.

При этом относительный недостаток природной водообеспеченности определяется как $\Delta l = 1 - E_v / E_{vonm}$.

Лесостепная зона (K_y = 0,6).

Среднесухой год (75% обеспеченности).

Урожайность Yp = 90 ц/га.

Согласно таблице, E_{vonm}= 560 мм; ΔE_v = 250 мм.

$Evi = E_{vonm} - \Delta E_v$ = 560 – 250 = 310 мм.

$$\Delta \ell_{vi} = 1 - \frac{E_{vi}}{E_{vonm}} = 1 - \frac{310}{560} = 1 - 0{,}555 = 0{,}445 \cdot$$

ΔY_i = -0,002 +0,33·0,445+1,07·(0,445)²=-0,002+0,147+0,212=0,36.

Таким образом, при снижении водообеспеченности люцерны на 44,5% от уровня оптимальной урожайность сена снизится на 36 % от Yp и составит

$$Y_i = Y_p\,(1 - \Delta Y_l) = 90 \cdot 0{,}64 = 57{,}4 \text{ ц/га}.$$

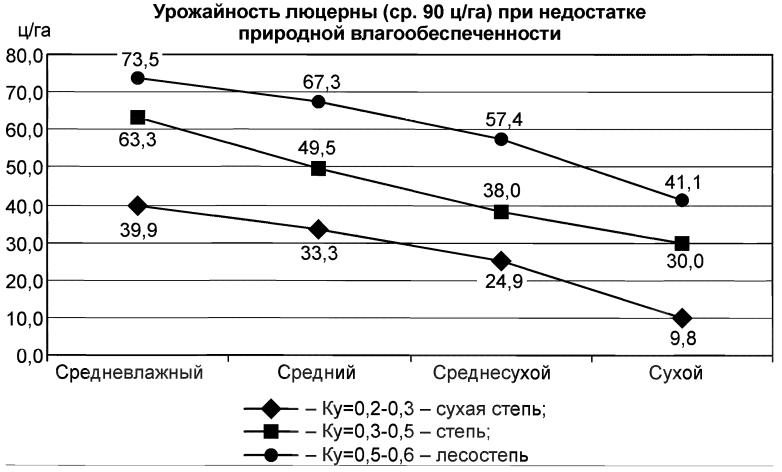


Рис. 27. Графики зависимости урожайности от природной влагообеспеченности

Пример расчета 2. Относительное снижение урожайности люцерны при снижении оросительной нормы по сравнению с оптимальной в разные по влажности годы (Уральский федеральный округ, лесостепная зона)

Зона	Год		Суммарное водопотребление, мм	Оросительная норма, мм
Лесостепная $Ку$ = 0,51-0,65	Средневлажный	P=25%	360	90
	Средний	P=50%	530	160
	Среднесухой	P=75%	580	240
	Сухой	P=95%	640	350

Среднее значение урожайности 90 ц/га.

ΔE_{vi} – снижение оросительной нормы;

E_{von} – суммарное водопотребление;

Δ_{yi} – относительное снижение урожайности;

$\Delta l_{vi}=1-(E_{vonm}-\Delta E_{vi})/E_{von}$ – относительное снижение водообеспечения;

y_i = -0,002+0,33·$\Delta\ell_{vi}$+1,07·$\Delta\ell_{vi}$^2 – уравнение связи.

Последовательность расчета представлена в табл. 29. В графе 1 приведена градация относительного снижения оптимальной оросительной нормы через 0,1, т.е. через каждые 10%, в графе 2 – остаточное водообеспечение ($E_{von}-\Delta E_{vi}$) соответственно в годы 25, 50, 75 и 95%-ной обеспеченности, в графе 3 – относительное снижение водообеспечения Δl_{vi}. По уравнению связи для люцерны определяется относительное снижение урожайности y_i (графа 4) в зависимости от снижения оросительной нормы (водообеспечения). Взяв среднее значение урожайности люцерны при оптимальном водообеспечении 90 ц/га, вычислено фактическое снижение урожайности (графа 5), в графе 6 приведена ожидаемая урожайность, ц/га.

По результатам расчета построены графики, приведенные на рис. 28.

Таблица 29

Последовательность расчета

Относительное снижение оросительной нормы	Водопотребление при сниженной оросительной норме, мм				Относительное снижение водообеспечения				Относительное снижение урожайности				Фактическое снижение урожайности, ц/га				Урожайность, ц/га			
	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%
1	2				3				4				5				6			
0,1	351	514	556	605	0,03	0,03	0,04	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	1,0	1,2	1,6	2,1	89,0	88,8	88,4	87,9
0,2	342	498	532	570	0,05	0,06	0,08	0,11	0,02	0,03	0,04	0,05	1,9	2,3	3,3	4,6	88,1	87,7	86,7	85,4
0,3	333	482	508	535	0,08	0,09	0,12	0,16	0,03	0,04	0,06	0,08	2,9	3,7	5,4	7,6	87,1	86,3	84,6	82,4
0,4	324	466	484	500	0,10	0,12	0,17	0,22	0,05	0,06	0,09	0,13	4,1	5,2	7,7	11,3	85,9	84,8	82,3	78,7
0,5	315	450	460	465	0,13	0,15	0,21	0,27	0,06	0,08	0,12	0,17	5,4	6,9	10,4	15,5	84,6	83,1	79,6	74,5
0,6	306	434	436	430	0,15	0,18	0,25	0,33	0,08	0,10	0,15	0,23	6,8	8,7	13,5	20,3	83,2	81,3	76,5	69,7
0,7	297	418	412	395	0,18	0,21	0,29	0,38	0,09	0,12	0,19	0,29	8,3	10,8	16,9	25,7	81,7	79,2	73,1	64,3
0,8	288	402	388	360	0,20	0,24	0,33	0,44	0,11	0,14	0,23	0,35	10,0	13,0	20,6	31,6	80,0	77,0	69,4	58,4
0,9	279	386	364	325	0,23	0,27	0,37	0,49	0,13	0,17	0,27	0,42	11,7	15,4	24,6	38,1	78,3	74,6	65,4	51,9
1	270	370	340	290	0,25	0,30	0,41	0,55	0,15	0,20	0,32	0,50	13,6	17,9	29,0	45,2	76,4	72,1	61,0	44,8



Рис. 28. Зависимость урожайности от снижения оросительной нормы

Данные табл. 30 рекомендуется как основная методическая предпосылка для решения проблемы в конкретном природном регионе. Приведенные зависимости являются усредненными, поэтому в конкретных природных условиях могут корректироваться с учетом местных почвенно-климатических особенностей.

Таблица 30

Уравнения связи относительного снижения урожайности кормовых сельскохозяйственных культур в зависимости от относительного снижения оросительной нормы в различных природных зонах в разные по влажности годы

Сельскохозяйственная культура	Обеспеченность Р, %	Уравнение связи
Лесолуговая зона		
Люцерна на сено	50	$\Delta Yi = 0{,}010 + 0{,}009 \cdot \Delta Xi + 0{,}117 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0{,}003 + 0{,}134 \cdot \Delta Xi + 0{,}117 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0{,}012 + 0{,}136 \cdot \Delta Xi + 0{,}227 \cdot \Delta Xi^2$

Продолжение табл. 30

Сельскохозяйственная культура	Обеспеченность Р, %	Уравнение связи
Зерновые колосовые	50	$\Delta Yi = 0,008 + 0,041 \cdot \Delta Xi + 0,0795 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,006 + 0,153 \cdot \Delta Xi + 0,095 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,002 + 0,160 \cdot \Delta Xi + 0,205 \cdot \Delta Xi^2$
Капуста поздняя	50	$\Delta Yi = -0,001 + 0,183 \cdot \Delta Xi + 0,106 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = 0,010 + 0,260 \cdot \Delta Xi + 0,170 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = -0,004 + 0,490 \cdot \Delta Xi + 0,205 \cdot \Delta Xi^2$
Лесостепная зона		
Люцерна на сено	50	$\Delta Yi = -0,001 + 0,128 \cdot \Delta Xi + 0,117 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,003 + 0,225 \cdot \Delta Xi + 0,159 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,007 + 0,203 \cdot \Delta Xi + 0,356 \cdot \Delta Xi^2$
Зерновые колосовые	50	$\Delta Yi = 0,004 + 0,234 \cdot \Delta Xi + 0,072 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,003 + 0,324 \cdot \Delta Xi + 0,186 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,006 + 0,326 \cdot \Delta Xi + 0,235 \cdot \Delta Xi^2$
Капуста поздняя	50	$\Delta Yi = -0,004 + 0,311 \cdot \Delta Xi + 0,155 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,001 + 0,425 \cdot \Delta Xi + 0,265 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,002 + 0,561 \cdot \Delta Xi + 0,303 \cdot \Delta Xi^2$
Зона умеренных степей		
Люцерна на сено	50	$\Delta Yi = -0,006 + 0,159 \cdot \Delta Xi + 0,330 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,005 + 0,274 \cdot \Delta Xi + 0,352 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,014 + 0,267 \cdot \Delta Xi + 0,595 \cdot \Delta Xi^2$
Зерновые колосовые	50	$\Delta Yi = 0,013 + 0,274 \cdot \Delta Xi + 0,277 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = 0,011 + 0,365 \cdot \Delta Xi + 0,420 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,002 + 0,510 \cdot \Delta Xi + 0,477 \cdot \Delta Xi^2$
Капуста поздняя	50	$\Delta Yi = -0,021 + 0,630 \cdot \Delta Xi + 0,193 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,016 + 0,779 \cdot \Delta Xi + 0,293 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = -0,031 + 0,914 \cdot \Delta Xi + 0,277 \cdot \Delta Xi^2$
Зона сухих степей		
Люцерна на сено	50	$\Delta Yi = 0,021 + 0,177 \cdot \Delta Xi + 0,542 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,016 + 0,277 \cdot \Delta Xi + 0,598 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = 0,011 + 0,335 \cdot \Delta Xi + 0,761 \cdot \Delta Xi^2$
Зерновые колосовые	50	$\Delta Yi = 0,005 + 0,409 \cdot \Delta Xi + 0,367 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = 0,009 + 0,502 \cdot \Delta Xi + 0,485 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = -0,009 + 0,693 \cdot \Delta Xi + 0,542 \cdot \Delta Xi^2$

Продолжение табл. 30

Сельскохозяйственная культура	Обеспеченность Р, %	Уравнение связи
Капуста поздняя	50	$\Delta Yi = -0,017 + 0,701 \cdot \Delta Xi + 0,269 \cdot \Delta Xi^2$
	75	$\Delta Yi = -0,035 + 0,895 \cdot \Delta Xi + 0,216 \cdot \Delta Xi^2$
	95	$\Delta Yi = -0,031 + 0,954 \cdot \Delta Xi + 0,333 \cdot \Delta Xi^2$

Примечание.

По материалам работы [8].

Базовое уравнение: $\Delta Yi = a + b\Delta Xi + c\Delta Xi^2$,

где ΔYi – относительное снижение урожайности (в долях от расчетной);

ΔXi – относительное снижение оросительной нормы (в долях от оптимальной);

a, b, c – параметры уравнения.

8. ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ОРОШЕНИЯ

8.1. Основные принципы оценки эколого-экономической эффективности

В результате внедрения систем планирования орошения в сельскохозяйственное производство обеспечиваются:

• оптимизация водного, питательного режимов почв и микроклимата на основе применения технологии дождевания, обеспечивающих увеличение урожайности не менее чем на 20%;

• снижение потерь оросительной воды на поверхностный сток и инфильтрацию до 20%, уменьшение выноса химических и питательных веществ из почвы в подземные воды и естественные водные источники за счет разработки новых технических средств и технологий полива, методов управления орошением, проектирования и оценки качества технологического процесса;

• экономия энергетических и материально-технических ресурсов на 15-20%;

• повышение производительности труда не менее чем на 50%.

Экономическая эффективность новых технологий и техники определяется по их влиянию на улучшение конечных показателей сельскохозяйственного производства, главным образом, на прирост прибыли за счет повышения урожайности культур и продуктивно-

сти животных, улучшения качества продукции, сокращения затрат труда и снижения себестоимости производства продукции.

Эколого-экономическая оценка эффективности орошения проводится в соответствии с нормативно-методическими документами (Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (2-я ред. Официальное изд. – М.: Экономика, 2000) и Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов мелиорации сельскохозяйственных земель (РД-АПК3.00.01.003-03) (М., 2002), основные положения которых соответствуют международным стандартам, что обеспечивает методическую базу технико-экономического обоснования конкретных проектов.

В качестве интегрального показателя оценки экономической эффективности использован прирост чистого дисконтированного дохода, определяемый на основе дисконтирования денежных потоков (операционных, инвестиционных, финансовых), а вспомогательного – срок окупаемости капитальных вложений.

В основу оценок эффективности положены следующие основные принципы, применимые к любым типам инновационных проектов в области мелиорации, независимо от их технических, технологических, финансовых, отраслевых или региональных особенностей:

• реализуемость технологий орошения оценивается возможностью реализации его технического, ресурсного, экологического и финансового обеспечения;

• рассмотрение результатов технологий орошения на протяжении всего его жизненного цикла (расчетного периода) – от начала внедрения до завершения;

• стоимостная оценка всех видов затрат и результатов на основе моделирования связанных с технологиями орошения потоков денежных поступлений и расходов за расчетный период;

• сопоставимость условий сравнения различных вариантов технологий орошения;

• учет влияния фактора времени. При оценке эффективности должны учитываться возможные изменения во времени: площадей и урожайности орошаемых земель, условий хозяйствования, социально-экономической ситуации; разные сроки службы технических средств и оборудования, необходимость инвестиций на капиталь-

ный ремонт в течение расчетного периода; неравноценность разновременных затрат и результатов;

- оценка эффективности производится сопоставлением ситуаций с применением различных технологий орошения, в основу оценки эффективности закладываются приросты денежных поступлений и расходов, получаемые каждым из участников проекта;

• принцип положительности и максимума эффекта: при сравнении альтернативных вариантов предпочтение должно отдаваться варианту с наибольшим значением эффекта;

• учет влияния факторов неопределенностей и риска, сопровождающих реализацию проекта.

Эффективность оценивается по приростному денежному потоку. Приростной денежный поток определяется как разность между денежными потоками по вариантам с применением различных технологий орошения.

В расчетах эффективности денежные поступления и расходы выражаются в неизменных ценах на определенную дату (например, на момент проведения расчетов). При этом все стоимостные показатели должны быть выражены в ценах на одну и ту же дату, и эта дата должна быть обязательно указана.

В расчетах эффективности используются цены сельскохозяйственной продукции, включающие в себя надбавки и скидки за ее качество, но не включающие дотации и НДС.

В расчетах эффективности используются, прежде всего, цены, сложившиеся в год реализации технологий орошения на оптовых и розничных рынках, биржах, ярмарках, а также при продаже сельскохозяйственной продукции заготовительным организациям, перерабатывающим предприятиям и иным сторонним фирмам.

В случае отсутствия в регионе сложившихся цен на ту или иную продукцию ее цена определяется в следующем порядке: объем произведенной продукции переводится в кормовые единицы (овес) на основе зональных коэффициентов, а затем умножением на коэффициент 0,8 – в зерновые единицы – пшеницу, на которую в данном регионе уже имеются сложившиеся цены.

8.2. Расчет эколого-экономической эффективности

Основным показателем эффективности является дисконтированный прирост чистого дохода, определяемый как накопленное за весь расчетный период сальдо приростного денежного потока.

Прирост чистого дисконтированного дохода при реализации технологий орошения по рекомендациям научно-технических материалов [102, 103, 104] может быть рассчитан на основе уравнения:

$$NPV = \sum_{1}^{T} (Э_ф - C - K)(1+E)^{-1},$$

где NPV – чистый дисконтированный доход, руб/га;

E – годовая процентная ставка, %;

T – расчетный период, годы;

K – капитальные вложения, руб/га;

$Э_ф$ – эффект, получаемый в результате реализации проекта, руб/га:

$$Э_ф = Э_{ор} + Э_э^n + Э_п + Э_у,$$

где $Э_{ор}$ – эффект от орошения в виде прироста стоимости производимой сельскохозяйственной продукции, руб/га;

$Э_э^n$ – предотвращенный экологический ущерб или экологический ущерб, связанный с изменением плодородия почв, руб/га;

$Э_п$ – эффект от изменения степени загрязнения водных ресурсов в результате реализации комплексных мелиораций, руб/га;

$Э_у$ – предотвращенный экологический ущерб в связи с увеличением стабильности сельскохозяйственного производства (снижение коэффициента вариации урожаев), руб/га.

Прирост ежегодных затрат (C) определяется по зависимости:

$$C = C_{с/х} + C_м,$$

где $C_{с/х}$ – прирост ежегодных затрат на производство сельскохозяйственной продукции, руб/га;

$C_м$ – прирост ежегодных затрат на эксплуатацию и содержание мелиоративных систем, руб/га.

Экономический эффект от орошения может быть рассчитан на основе уравнения:

$$Э_{ор} = Ц \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta B_t - C_t^{мел} - \Delta C_t^{с/х} - C_t^{пр} - C_t^{экм} - C_t^{кн} + ЛС_t \right] \to \max,$$

где ΔB_t – прирост выручки от реализации сельскохозяйственной продукции, полученной в результате орошения с использованием конкретной дождевальной техники в году t расчетного периода T, руб.;

$C_t^{мел}$ – ежегодные издержки по эксплуатации оросительной системы (без учета отчислений на реновацию во избежание двойного счета капитальных вложений в осуществление мелиоративных мероприятий), руб.;

$\Delta C_t^{с/х}$ – прирост ежегодных издержек на производство сельскохозяйственных культур на орошаемых землях, руб.;

$C_t^{пр}$ – ежегодные издержки, связанные с осуществлением превентивных мер и направленные на поддержание природного плодородия почв и охрану водных ресурсов при орошении сельскохозяйственных культур (природоохранные затраты), руб.;

$C_t^{экм}$ – размер ущерба в году t расчетного периода, который может быть нанесен природной среде в результате проведения орошения, руб.;

$C_t^{кн}$ – косвенные и прямые налоги, руб.;

$ЛС_t$ – ликвидная стоимость основных фондов, выбывающих в году t, руб.

Прирост продуктивности сельскохозяйственных культур в денежном выражении от орошения в конкретном году [112] предлагается определять следующим образом:

$$\Delta B_t = Ц \sum_{j=1}^{n} (У_j^{op} - У_j^{тех}) \times К_1 \times К_2 \times К_3 \times F_{op} \times \alpha_j \times КЗИ,$$

где $Ц$ – стоимость сельскохозяйственной продукции, определяется по оптовым ценам, сложившимся в конкретном регионе, руб/ц;

$У_j^{op}$ – потенциальная урожайность j-ой сельскохозяйственной культуры на орошаемых землях при оптимальных сочетаниях всех

факторов внешней среды, ц/га (определяется по имеющимся на сегодняшний день уравнениям или принимается по данным государственных сортоиспытательных участков);

$У_j^{тех}$ – урожайность j-ой сельскохозяйственной культуры без орошения, ц/га;

$К_1$ – коэффициент, учитывающий равномерность увлажнения земель различной поливной техникой;

$К_2$ – коэффициент, учитывающий возможность снижения урожайности из-за отклонения влажности почвы от оптимальной;

$К_3$ – коэффициент, учитывающий несоответствие фактического содержания элементов минерального питания в почве оптимальному значению;

$F_{ор}$ – площадь орошаемых земель, га;

α_j – доля j-ой культуры в севообороте;

КЗИ – коэффициент земельного использования;

$Ц_j$ – цена реализации j-ой культуры в году t, руб/ц.

Экологический коэффициент качества полива [113] предлагается рассчитывать по формуле

$$K_1 = \frac{K_М}{K_Д},$$

где $K_М$ – коэффициент эффективности полива по Кристиансену;

$K_Д$ – коэффициент равномерности распределения для естественных дождей $\approx 0{,}9$.

Экологический коэффициент, учитывающий отклонение влажности корнеобитаемого слоя почвы от оптимальной, который может быть определен по формуле

$$K_2 = \frac{W_Н + W_k}{2} \Big/ 0{,}9 \cdot W_{Н.В},$$

где $W_н$ и W_k – начальные и конечные влагозапасы активного слоя почвы за расчетный период, мм;

$W_{Н.В}$ – влагозапасы, соответствующие наименьшей влагоемкости, мм.

Предотвращенный экологический ущерб, связанный с сохранением плодородия почв ($Э_э^п$), определяется по формуле [2]

$$Э_э^п = У_{уд}^п \cdot \Delta S \cdot К_п,$$

где $Э_э^п$ – величина предотвращенного экологического ущерба, руб/га;

$У_{уд}^п$ – показатель удельного экологического ущерба почвам, руб/га;

ΔS – увеличение плодородия почв в результате реализации всех мероприятий, в долях от единицы;

$К_п$ – коэффициент, учитывающий плодородие почв, руб/га.

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения водных ресурсов определяется по формуле

$$Э_э^в = \sum_{1}^{\bar{n}} (У_{уд}^в \cdot \sum \Delta M) \cdot К_э,$$

где $Э_э^в$ – величина предотвращенного экологического ущерба водным ресурсам, связанного с уменьшением смыва почвы в результате повышения качества полива или осуществления агротехнических и лесотехнических мероприятий, руб/га;

$У_{уд}^в$ – показатель удельного ущерба (цены загрязнения) водным ресурсам по водным бассейнам, руб/усл. т;

ΔM – приведенная масса загрязненных веществ, не поступивших в водный источник в результате реализации мероприятий по вариантам, усл. Т.

$\Delta M = M_o - M_1$; M_o и M_1 – поступление загрязненных веществ до и после осуществления мероприятий, усл. m:

$$M_0 = m_0 \cdot К_{эi}; \qquad M_1 = m_1 \cdot К_{эi},$$

m_0 и m_1 – фактическая масса загрязнений, т;

$К_{эi}$ – коэффициент относительной эколого-экономической опасности для каждого загрязняющего вещества.

8.3. Учет факторов неопределенности и риска в расчетах эколого-экономической эффективности

Эффективность технологий орошения зависит от значений его основных параметров (природно-климатических условий конкретного года, урожайности сельскохозяйственных культур, размеров капитальных затрат и др.). То сочетание параметров, при которых оценивается эффективность, называется сценарием реализации технологий орошения. Однако оценка эффективности технологий орошения производится в условиях неопределенности, т.е. неполной и/или неточной информации о внешних факторах. Это значит, что в условиях неопределенности возможны различные сценарии реализации технологий орошения, и каждый из них будет иметь свои показатели эффективности.

Основные параметры оросительных систем назначаются с учетом следующих факторов: природно-климатические условия региона, обеспеченность водных источников для орошения, режим орошения (осушения), техника полива, способы водоотвода, прогнозируемый уровень стояния грунтовых вод и степень их засоления. Следовательно, фактор риска при разработке технологий орошения учитывается. Однако остается неучтенным комплекс факторов, связанных с экстремальными природными явлениями, производственно-технологическими, финансовыми форс-мажорными обстоятельствами.

Производственно-технологический риск связан с нарушениями в процессе сельскохозяйственного производства и эксплуатации технических средств по следующим причинам:

- поломки сельскохозяйственных машин и оборудования;
- внесение органических и минеральных удобрений ниже запрограммированных норм;
- выполнение полевых работ и уборки урожая с отклонением от фаз развития растений;
- некачественное выполнение полевых работ;
- превышение расхода ресурсов над установленными по техническим условиям;
- потери рабочего времени, вызванные случайными и непредвиденными обстоятельствами;
- безответственность и некомпетентность работников;
- влияние болезней и вредителей растений;

• выход из строя в вегетационный период одного или нескольких основных гидротехнических сооружений или оборудования насосных станций, дождевальных машин, который может оказать влияние на режим подачи воды на орошение и водоотведение при осушении и орошении земель.

Коммерческий риск связан с реализацией продукции на товарном рынке из-за уменьшения емкости рынка, снижения платежеспособности покупателя, появления новых конкурентов.

Финансовый риск связан с неплатежами партнеров, колебанием рыночных цен, перерасходом средств на выплату штрафов, дополнительными, ранее не предвиденными затратами и потерями, изменением условий получения в худшую сторону или уменьшением суммы выделенных средств.

Форс-мажорные обстоятельства – это внешние факторы неопределенности и риска, не зависящие от сельскохозяйственных предприятий, например:

риск, связанный с нестабильностью экономического законодательства, текущей экономической ситуации, условиями инвестирования и использования прибыли;

риск, сопряженный с неблагоприятными социально-политическими изменениями в стране.

К рискам, связанным с экстремальными природными явлениями, относятся чрезвычайно засушливое лето или выпадение обильных осадков в вегетационный сезон, затопление посевов дождевыми или паводковыми водами рек, гибель посевов от вымерзания, вымокания, ранние осенние заморозки, гибель урожая от суховеев и града.

Для количественной оценки неопределенности, вызванной пространственно-временной изменчивостью гидрометеорологических условий (климатический фактор) предложено использовать стандартное уравнение для расчета показателя ожидаемого интегрального эффекта $Э_{ожс}$.

При этом, если вероятности различных условий реализации проекта известны точно, то ожидаемый интегральный эффект рассчитывается по формуле математического ожидания

$$Э_{ожс} = \sum\nolimits_i Э_i P_i,$$

где $Э_{ожс}$ – ожидаемый интегральный эффект проекта;

$Э_i$ – интегральный эффект при i-ом условии реализации;

P_i – вероятность реализации этого условия.

Формула может быть преобразована с учетом того, что в качестве ожидаемого интегрального эффекта принимается прирост урожайности от орошения сельскохозяйственных угодий. Тогда уравнение примет вид:

$$\Delta У_{\text{var}} = \sum_i \Delta У_i^{op} \cdot P_i,$$

где $\Delta У_{\text{var}}$ – ожидаемый прирост урожайности от орошения за жизненный цикл орошаемого участка с учетом пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических условий, т/га;

$\Delta У_i^{op}$ – прирост урожайности сельскохозяйственной культуры на орошаемых землях при оптимальных сочетаниях всех факторов внешней среды, для различных по тепло-, влагообеспеченности лет, т/га.

$$\Delta У_i^{op} = \Delta У_i \cdot У_i,$$

где $У_i$ – потенциальная урожайность на орошаемых землях, т/га (табл. 31, 32).

Таблица 31

Вероятностные значения относительного снижения урожайности при дефиците природной водообеспеченности сельскохозяйственных культур

Природная зона	Коэффициент увлажнения, *Ку*	Вероятностные (обеспеченные) значения относительного снижения урожайности ΔУ*i* (%)					
		5%	25%	50%	75%	85%	95%
1	2	3	4	5	6	7	8
Многолетние травы							
Сухостепная	0,21-0,30	24	43	60	76	84	95
Степная	0,31-0,40	14	32	49	63	71	86
Степная	0,41-0,50	6	22	40	54	62	78
Лесостепная	0,51-0,60	1	15	31	46	55	71
Лесостепная	0,61-0,70	0	10	24	39	48	66
Лесостепная	0,71-0,80	0	6	18	32	42	59

Продолжение табл. 31

1	2	3	4	5	6	7	8
Лесная	0,81-1,0	0	2	12	26	37	53
Овощные культуры							
Сухостепная	0,21-0,30	53	75	88	98	100	100
Степная	0,31-0,40	37	59	74	87	95	100
Степная	0,41-0,50	24	45	60	76	85	97
Лесостепная	0,51-0,60	13	33	49	67	76	90
Лесостепная	0,61-0,70	5	23	39	57	67	83
Лесостепная	0,71-0,80	0	15	30	48	58	76
Лесная	0,81-0,90	0	9	23	40	50	68
Лесная	0,91-1,0	0	4	16	33	42	60

Таблица 32

Характеристика пространственно-временной изменчивости природной тепло-, влагообеспеченности

Зона увлажнения	Коэффициент увлажнения, *Ку*	Обеспеченность различных по увлажнению лет					
		сухих			средних 50%	влажных 25%	избыточно влажных 5%
		95%	85%	75%			
Лесная	0,81-1,00	0	5	10	25	30	30
Лесостепная	0,51-0,80	0	15	25	30	30	10
Степная	0,41-0,50	10	25	35	20	5	5
Сухостепная	0,31-0,40	35	45	15	5	0	0
Полупустынная	0,21-0,30	75	20	5	0	0	0
Пустынная	< 0,2	100	0	0	0	0	0

Данные о приростах урожайности от орошения в различных почвенно-климатических зонах для лет различной тепло-, влагообеспеченности принимаются по материалам исследований ФГБНУ ВНИИ «Радуга».

Вероятность возникновения различных условий тепло-, влагообеспеченности рассчитывается по кривой обеспеченности, построенной по данным метеостанций за период 30-50 лет расположенных в конкретной почвенно-климатической зоне. Для прогнозных расчетов могут быть приняты следующие вероятности лет различных по условиям теплообеспеченности и увлажнения.

В связи с изложенными факторами при экономическом обосновании технологий орошения следует рассмотреть два сценария прогноза: оптимистический (проектный) и умеренно пессимистический. Расчеты эффективности по оптимистическому сценарию приводятся в проектной документации. Они являются базовыми для последующего расчета по умеренно пессимистическому сценарию прогноза с учетом факторов риска и неопределенности.

Проверяется чувствительность экономических показателей технологий орошения на возможное увеличение объема капитальных вложений по сравнению с суммой, которая была определена сводным сметным расчетом. Такое увеличение объема капитальных вложений сверх установленного сметными расчетами возможно из-за складывающихся в процессе строительства природных (климатических, гидрологических, геологических и гидрогеологических) условий, выплаты штрафов, потерь материальных ресурсов и т.д. В этой связи производятся дополнительно экономические расчеты на случай возможного увеличения объема капитальных вложений, по сравнению с проектными, на 10, 20 и 30%.

Неопределенность затрат учитывается в расчетах путем введения резервов средств на непредвиденные текущие расходы (например, на ликвидацию возможных аварий, внеплановые ремонты сооружений и оборудования и т.д.).

Денежные потоки по умеренно пессимистическому сценарию (ожидаемые денежные потоки) рассчитываются на основе соответствующих параметров этого сценария в соответствии с положениями настоящих Рекомендаций.

Показатели эффективности технологий орошения с учетом факторов неопределенности и риска (показатели ожидаемой эффективности – ожидаемый ДПЧД, ожидаемая ВНД и т.д.) определяются в этом случае по общим правилам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оросительные нормы (нетто) и их внутрисезонное распределение для основных сельскохозяйственных культур по регионам Российской Федерации // Сб. под общей ред. д-ра с.-х. наук Ольгаренко Г.В. – Коломна, 2003.

2. **Godd E.F.** The relational model for database management: version 2. Addison-Weslej Longman Publishing Co., Inc., 1990. – 567p.

3. **Альт В.В.** Информационные технологии как фактор повышения эффективности выбора технологических решений// Матер. V Междунар. науч.-практ. конф. – Самара, 2005.

4. **Войтович Н.В., Полев Н.А., Покидова Л.В.** Анализ изменения основных показателей погодных условий по данным Немчиновской метеостанции НИИ сельского хозяйства центральных районов Нечерноземной зоны / Теорет. разработки. – 2002.

5. **Галямин Е.П.** Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – С. 272.

6. **Галямин Е.П., Соколов А.Л.** Использование расчетных методов для оценки орошения сельскохозяйственных культур в условиях дефицита водных ресурсов // Вопросы совершенствования мелиорат. систем. – 1985. – С. 33-42.

7. **Герасимов И.П.** Научные основы современного мониторинга окружающей среды // Известия АН, сер. геогр. – 1978. – № 3. – С. 13-25.

8. **Голяндина Н.Э.** Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов: учеб. пособ. – СПб, 2004.

9. **Данильченко Н.В., Быков В.Г.** Режимы орошения и оперативное управление поливами: справ. «Механизация полива». – М.: ВО Агропромиздат, 1990.

10. **Державин Л.М.** Применение минеральных удобрений в интенсивном земледелии. Зерновые культуры. Картофель. Лен-долгунец. Сахарная свекла. – М.: «Колос», 1992.

11. **Драгавцева И.А., Луценко Е.В., Лопатина Л.М.** Автоматизация системного анализа продуктивности плодовых культур юга России // Докл. Российской академии с.-х. наук. – № 2. – 2004.

12. **Жученко А.А**. Адаптивное растениеводство. – Кишинев: Штиинца, 1990.

13. **Иванов Д.А., Рубцова Н.Е.** Создание региональных агрогеоинформационных систем адаптивно-ландшафтного земледелия // Докл. Российской академии с.-х. наук. – № 6. – 2005.

14. **Израэль Ю.А.** Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 376 с.

15. **Израэль Ю.А**. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка окружающей природной среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 7. – С. 3-8.

16. **Израэль Ю.А., Сиротенко О.Д.** Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства в России // Метеорология и гидрология. – № 6. – 2003.

17. **Капустина Т.А., Аванесян И.М., Спирина Е.Ю.** Изменения показателей потенциала природных ресурсов тепло-, влагообеспеченности за многолетний период, их влияние на агроклиматические условия и биопродуктивность: сб. тез. докл. Междунар. конгресса «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК). – М.: МВЦ «Крокус Экспо», 2008.

18. **Капустина Т.А., Брыль С.В., Бочкарева А.И.** Формирование информационной технологии планирования поливов сельскохозяйственных культур как основы ресурсо-, энергосберегающего орошаемого земледелия: сб. науч. докл. «Информационные технологии». – М.: МГАУ им. Горячкина, 2010.

19. **Каюмов М.К.** Справочник по программированию урожаев. – М.: Россельхозиздат, 1977.

20. **Кислов А.В.** Основы теории палеоклиматов плейстоцена и голоцена в книге «Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим)». – М.: Научный мир, 2000.

21. **Кондратьев К.Я.** Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. – № 6. – 2004.

22. **Константинов А.Р.** Погода, почва и урожай озимой пшеницы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978.

23. **Крыщенко В.С., Голозубов О.М.** и др. База данных широкомасштабного почвенно-экологического мониторинга агроландшафтов: реляционный подход. – М.: Агрохимический вестн. – 2010. – № 1.

24. **Кузенкова Г.В.** Введение в экологический мониторинг: учеб. пособ. – Н. Новгород: НФ УРАО, 2002. – 72 с.

25. **Лопатина Л.М., Драгавцева И.А.** Концепция создания единой автоматизированной системы управления селекционно-производственным процессом при выращивании сельскохозяйственных культур: Докл. Российской академии с.-х. наук. – 2005. – № 1.

26. Методические указания по оперативной корректировке эксплуатационных режимов механизированного орошения сельскохозяйственных культур. – Коломна, 1982.

27. **Михайленко И.М., Курашвили А.Е.** Система мониторинга состояния многолетних трав в Ленинградской области // С.-х. вести. – 2004. – № 3.

28. **Михайленко И.М., Тимошин В.Н., Данилова Т.Н.** Математическое моделирование системы «почва-растение-атмосфера» на примере многолетних трав// Докл. Российской сельхозакадемии. – 2009. – № 4.

29. **Михайлов В.В.** Технология электронного картографирования // Агрохим. вестн. – 1999. – № 4.

30. **Нечипорович А.А.** О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах: сб. «Фотосинтез и вопросы продуктивности растений». – М.: АН СССР, 1963.

31. **Ольгаренко Г.В., Аванесян И.М., Капустина Т.А.** и др. Оценка современного почвенно-климатического потенциала агроэкосистем и его трансформации под влиянием природных и технологических факторов с целью регулирования и оптимизации водного и пищевого режима почв на орошаемых землях Уральского ФО: реком. – Коломна: ФГНУ ВНИИ «Радуга», 2008.

32. **Ольгаренко Г.В., Капустина Т.А.** Информационное обеспечение рационального водопользования при орошении: сб. докл. науч.-практ. конф. – Углич, 2010.

33. **Ольгаренко Г.В., Щербина И.В., Аванесян И.М., Капустина Т.А.** и др. Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование (Raduga Irrigation). Программа для ЭВМ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610137, дата регистрации 11.01.2009.

34. **Остапчик В.П., Костромин В.А., Коваль А.М.** и др. Информационно-советующая система управления орошением. – Киев: Изд-во «Урожай», 1989.

35. Отчет о НИР «Разработка рекомендаций по водосберегающим параметрам орошения для оценки и управления водным режимом мелиорируемых агроландшафтов, обеспечивающих устойчивую кормовую базу животноводства». – ФГНУ ВНИИ «Радуга», 2007.

36. **Плохинский Н.А.** Биометрия. – М.: МГУ, 1970.

37. **Просянникова О.И., Михайлов В.В.** и др. Применение Гистехнологий при дистанционном мониторинге земель сельскохозяйственного назначения. – Агрохим. вестн. – 2010. – № 1.

38. **Рябчиков А.М.** Гидротермические условия и продуктивность фитомассы в основных ландшафтных зонах. – Вест. МГУ, 1968. – № 5 (сер. геогр.).

39. **Саноян М.Г.** Агрометеорологические основы управления влагообеспеченностью посевов. – Ереван: Айстан, 1981. – С. 371.

40. **Селянинов Г.Г.** Методика сельскохозяйственной характеристики климата / Мировой агроклимат. справ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957.

41. **Сиротенко О.Д.** Имитационная система климат-урожай СССР // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 4.

42. Система программированного выращивания урожаев: рекл. просп. – Калинин: ГИВЦ ВРО ВАСХНИЛ, 1987. – С. 4.

43. **Сорочан К.И., Кан Н.А.** Оперативное управление орошением по метеорологическим параметрам с помощью персональной ЭВМ // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 1987. – С. 85-92.

44. **Сычев В.Г.** Модель прогноза изменения урожайности из книги «Тенденция изменения агрохимических показателей плодородия почв Европейской части России». – М., 2006.

45. **Сюткин В.М.** Экологический мониторинг административного региона (концепция, методы, практика на примере Кировской области). – Киров: ВГПУ, 1999. – 232 с.

46. **Усков И.Б., Державин Л.М.** Эффективность удобрений и продуктивность земледелия при глобальном изменении климата // Плодородие. – 2008. – № 2.

47. Циклические процессы в природе и обществе / Под ред. Чурсина В.Д. – Ставрополь, 1993.

48. **Шафронов О.Д., Сорочкин М.А.** Моделирование урожайности зерновых культур // Агрохимический вестн. – 2005. – № 4.

49. **Шашко Д.И.** Агроклиматическое районирование СССР. – М.: Изд-во «Колос», 1967.

50. **Щербина И.В.** Применение информационных технологий для оценки регионального природно-ресурсного потенциала тепло-, влагообеспеченности земледельческих территорий агроландшафтов России: сб. науч. докл. 5-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – Коломна, 2008.

51. **Ягудин Н.В.** Оперативное планирование эксплуатационных режимов орошения при использовании широкозахватных дождевальных машин: дис. … канд. техн. наук. – Коломна, 1987.

52. **Якушев В.П., Якушев В.В.** Математические модели и методы реализации информационно-технологических приемов в точном земледелии // Докл. Российской акад. с.-х. наук. – 2008. – № 4.

53. **Степанов А.Б.** Депмелиоводхоз МСХ РФ. Проблемы орошаемого земледелия в ЦЧО // Вопросы мелиорации. – 2002. – № 5-6.

54. **Дементьев А.В., Рожнов С.И.** Эффективность капельного орошения овощных и плодовых культур // Науч.-практ. конф. проф.-препод. состава, аспирантов и науч. сотр. по итогам работы за 2001 г. – Волгоград, 2001. – 89 с.

55. **Носенко В.Ф., Балабан Е.И., Ландес В.Г.** Аспекты агробиологической и экологической оценки технологий орошения с различной интен-

сивностью водоподачи // Мелиорация и водное хоз-во: обзорн. информ. ЦБНТИ Госконцерна «Водстрой». – М., 1991. – 68 с.

56. **Гостищев Д.П., Пушко М.И.** Экономическая эффективность использования орошаемых земель и развитие орошаемого земледелия в Саратовской области: сб. Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова. – Саратов, 1999.

57. **Константинов А.Р., Струнников Э.А.** Нормирование орошения. Методы, их оценка. Пути уточнения // Гидротехника и мелиорация. – № 1, 2, 3. – 1986.

58. **Волков А.С., Тульверт В.Ф., Фиалковский П.Г.** Оценка существующих методов обоснования режимов орошения // Мелиорация и водное хозяйство. – 1996 – № 4.

59. **Шумаков Б.Б.** Научные основы ресурсосбережения и охраны природы в мелиорации и в одном хозяйстве. – М.: ВНИИГиМ, 1998. – 312 с.

60. **Айдаров И.П.** Комплексное обустройство земель. – М.: МГУП, 2007. – 208 с.

61. Орошение: справ. под. ред. Шумакова Б.Б.– М.: Колос, 1999. – 432 с.

62. **Ольгаренко В.И., Колганов А.В., Ольгаренко Г.В.** Эксплуатационные режимы орошения агроценозов Нижне-Донской провинции степной зоны / НГМА. – Мелиоводинформ, 2001. – 149 с.

63. **Ольгаренко Г.В.** Нормирование орошения люцерны с учетом вероятностного характера гидрометеорологической и водно-балансовой информации. – Новочеркасск / НГМА, 1996. – 136 с.

64. Система программированного выращивания урожаев: рекл. просп. – Калинин: ГНВЦ ВРО ВАСХНИЛ, 1987. – 4 с.

65. **Шабанов В.В.** Влагообеспеченность яровой пшеницы и ее расчет. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 141 с.

66. Оптимальное управление поливами при эксплуатации оросительных систем. – М.: ВО Агропромиздат, 1990. – 32 с.

67. **Константинов А.Р., Химии Н.М.** Унифицированная методика расчета норм водопотребности применительно к автоматизированной системе нормирования водопользования в орошаемом земледелии. – ЛГМИ, 1987.

68. **Черемисинов А.Ю.** Управление водными режимами экологически сбалансированной агросистемы на орошаемых черноземах: авт. дис. … д-ра с.-х. наук. – Волгоград, 1993. – 35 с.

69. **Левенко А.А.** К вопросу расчета испарения, испаряемости и влагозапасов почвы по метеоданным // Вопросы агроклиматологии: сб. и тр. УкрНИИ гидротехники и мелиорации. – М.: Гидрометеозидат. – Вып. 105. – С. 51-59.

70. **Лобжанидзе З.С.** К вопросу расчета водопотребления сельскохозяйственных культур в зависимости от влажности почвы // Вопросы гидромелиорации в Грузии. – Тбилиси, 1977. – Вып. 4. – С. 53-58.

71. **N. Kloche.** at.al/ Evapotrauspiration and Crop Water Use – Neb.Gurde. G90-992-A-2003.

72. Мелиорация и водное хозяйство за рубежом / Экспресс-информация. – М.: ЦБНТИ, Минводхоз СССР, 1988.

73. Departament of Natural Resouras. Improvinq Queensland s Rural Water Ust/ Efficitcy the Facts, Queensland Departament of Natural Resouras, Bri sbane. http // w.w.w. qld ar// water/ rwue. 2001.

74. Broner Irriqation schedulinq. The Water Balanct Approach № 4. 707, Univercity ct Colorado, //93, w.w.w. colostate tdn /Depts/ coopExt-2004.

75. Irrigation Schedulinq. Irriqation Schedulinq usinq Evaporution Data and Crop Fuctors. 2004- 03-1001.

76. Evapotraspiration (TN) Gr Grop Wuter Use // Neb. Gride, Uniutrs I ty af Ne Graske. – 2003.

77. **Пенман Х.Л.** Растение и влага / Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968.

78. **Будаговский А.И.** Испарение почвенной влаги. – М.: Наука, 1964.

79. **Зубенок Л.И.** Испарение на континентах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976.

80. **Кузник И.А., Чумакова Л.Н., Васильев А.С.** Анализ и корректировка формул для расчета суммарного испарения основных орошаемых культур в Заволжье // Науч. тр. Саратовский СХИ, 1978. –Вып. 120.

81. **Циприс Д.Б., Евтушенко Э.Г.** Расчет водопотребления по метеопараметрам // Гидротехника и мелиорация, 1980. – № 9. – С. 72.

82. **Кочетков А.П.** Расчет режима орошения в Западной Сибири с помощью биологических коэффициентов // Гидротехника и мелиорация. – 1980. – № 2. – С. 34.

83. **Угрехелидзе Ш.** Водопотребление сельскохозяйственных культур в горных условиях // Гидротехника и мелиорация. – 1980. – № 10. – С. 67.

84. **Струнников Э.А.** Об изменчивости биологических коэффициентов при расчете водопотребления сельскохозяйственных культур // Гидротехника и мелиорация. – 1977. – № 12. – С. 52.

85. **Местечкин В.Б.** Пространственная интерполяция биологических коэффициентов водопотреблеиия // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 11. – С. 43.

86. **Голченко М.Г., Вихров В.И.** Расчет суточного водопотребления многолетних трав // Гидротехника и мелиорация. – 1985. – № 7. – С. 37.

87. **Яковлев С.А.** О дифференцировке переходных коэффициентов для расчетов водопотребления // Водное хозяйство. – Киев: Урожай, 1980. – Вып. 1. – С. 18-21.

88. **Талалаевский Г.В.** Водно-теплобалансовый метод определения водопотребления и режим орошения сельскохозяйственных культур // Науч. тр. ВО Союзводпроект // Вопросы проектирования технически совершенных мелиоративных систем. – М., 1977. – № 47. – С. 16-23.

89. **Михильцевич А.И., Жуков А.Е.** Испарение с посевов трав на минеральных почвах // Управление водным режимом мелиорированных земель / БелНИИМиВХ. – Минск, 1987. – С. 63-68.

90. **Горбачева Р.И., Кабаков М.М.** Изменение биоклиматических коэффициентов по климатическим зонам / Метеорология и гидрология. – 1976. – № 12. – С. 92-101.

91. Компьютерная программа «Расчет параметров режимов орошения сельскохозяйственных культур» (ROCK.xls). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ за № 2004610996. 22 апреля 2004 г.

92. **Данильченко Н.В., Аванесян И.М., Никольская А.А.** и др. Влияние природной тепло-, влагообеспеченности на параметры орошения и урожайность сельскохозяйственных культур в ЦЧО. – М., 2004.

93. Отчет о НИР «Проведение исследований по оценке параметров орошения для обеспечения экологической безопасности и повышения плодородия почв при поливе». – ФГНУ ВНИИ «Радуга», 2004.

94. **Капустина Т.А., Аванесян И.М.** Нормирование орошения по природно-климатическим зонам как основа рационального водопользования // Мелиорация и водное хозяйство. – № 3. – 2004. – С. 18.

95. **Хан Г. Д. Шапиро С.С.** Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 270 с.

96. **Митропольский А.К.** Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971. – 310 с.

97. Физико-географическое районирование СССР / Под ред. Гвоздецкого Н.А. – М.: Изд. МГУ, 1968. – 427 с.

98. **Жуков В.А., Святкина О.А.** К вопросу адаптации с.-х. центра Европейской России к возможным изменениям климата // Метрология и гидрология. – № 4. – 2002. – С. 85-92.

99. **Сиротенко О.Д., Павлова Н.Д.** Оценка влияния изменения климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов // Метрология и гидрология. – 2003. – № 8. – С. 89-99.

100. Водопотребление и режимы орошения сельскохозяйственных культур: справ. «Мелиорация и водное хозяйство». – Т.: «Орошение». – М., Колос, 1999.

101. Научно-методическое обоснование нормирования водопотребления, планирование орошения, регулирование уровня плодородия почв на основе информационной технологии для предотвращения экологического дисбаланса: реком. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006.

102. **Краснощеков В.Н.** Теория и практика эколого-экономического обоснования комплексных мелиораций в системе адаптивно-ландшафтного земледелия. – М.: МГУП, 2001.

103. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. – М, 2000.

104. **Райнин В.Е**. Эффективность мелиоративного инвестиционного проекта и экономическая прибыль от мелиорации / В.Е. Райнин, Г.А. Парфенов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2004. – № 4. – С. 18-25.

105. Колебания и изменение климата на территории России // Известия РАН. «Физика атмосферы и океана». – № 2. – 2003.

106. **Войтович Н.В.** Анализ изменения основных показателей погодных условий по данным Немчиновской метеостанции / Войтович Н.В., Полевой Н.А., Покидова Л.В./ НИИСХ УРНЗ.

107. **Данильченко Н.В.** Расчет режимов орошения сельскохозяйственных культур // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 1.

108. **Шрейдер Ю.А.** Метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло). – М.: Физматиз, 1962.

109. **Рождественский А.В.** Статистические методы в гидрологии / Рождественский А.В., Чеботарев А.И. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974.

110. **Пановский Г.А.** Статистические методы в метеорологии / Пановский Г.А., Брайер Г.В. – Изд. 2-е. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972.

111. **Данильченко Н.В.** Метод построения кривых обеспеченности оросительных норм при коротких рядах наблюдений / Данильченко Н.В., Остроушко В.Н., Омельяненко С.И. / ВНИИ «Радуга». – Коломна, 1998.

112. **Ольгаренко Д.Г.** Механизм учёта социально-экологических факторов при оценке эффективности инвестиционных проектов для регионов с орошаемым земледелием / Региональная экон. Теор. и практ. 12 (51). – М.: Изд. дом «Финансы и кредит», 2007. – С. 128-132. – 0,5 п.л. (изд. рекомендовано ВАК).

113. **Ольгаренко Д.Г.** Оценка экологических последствий эксплуатации техники орошения в различных регионах России / Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 6 (27). – М.: Изд. дом «Финансы и кредит», 2008. – С. 98-105. – 0,6 п.л. (изд. рекомендовано ВАК).

ПРИМЕР РАСЧЕТА

1. На основе исходных данных за 58-летний ретроспективный период по метеостанции Коломна были установлены **средние многолетние и вероятностные параметры орошения** для люцерны. Расчеты, включая статистическую обработку данных, производились на ПК по методике ФГБНУ ВНИИ «Радуга» за период с температурой воздуха выше 5°С в разные по увлажненности (обеспеченности) годы.

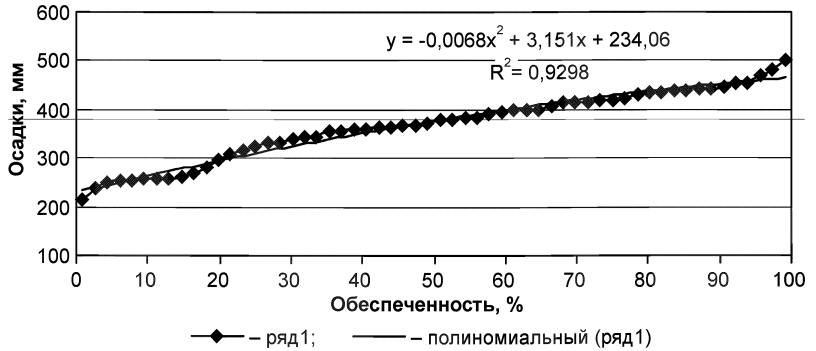


Рис. 1А. Эмпирическое распределение осадков по метеостанции Коломна за период 1950-2006 гг.

Таблица 1А

Испаряемость

Метеостанция	Вероятностные (обеспеченные) значения испаряемости (Е), мм						Статистические характеристики		
	5%	25%	50%	75%	85%	95%	E_{xo}%	C_v	E_{cv} %
Коломна	284	343	390	434	460	496	2,4	0,16	11

Примечание. Влажный год – 5% обеспеченности; средневлажный год – 25%; средний год – 50%; среднесухой год – 75%; сухой год – 85%; сухой год – 95% обеспеченности.

Таблица 2А

Суммарное водопотребление люцерны прошлых лет

Метеостанция	Вероятностные (обеспеченные) значения суммарного водопотребления, *Еу*, мм						Статистические характеристики		
	5%	25%	50%	75%	85%	95%	E_{xo},%	C_v	E_{cv},%
Люцерна прошлых лет									
Коломна	290	326	356	388	404	430	1,8	0,12	11

Таблица 3А

Дефициты водопотребления

Метеостанция	Вероятностные (обеспеченные) дефициты водопотребления (оросительные нормы) ΔE_V, мм						Статистические характеристики		
	5%	25%	50%	75%	85%	95%	Σ_{xo},%	Cv	Σ_{Cv},%
Люцерна прошлых лет									
Коломна	0	9	43	86	112	157	14	0.95	14

Таблица 4А

Экологически безопасные (технологические) поливные нормы для условий Московской области, м^3/га

Водопроницаемость почвы, *Kv*	Люцерна прошлых лет	
	начало отрастания	бутонизация – цветение
Повышенная *Kv* = 0,61-0,9	300-400	400-500
Средняя *Kv* = 0,31-0,6	300-400	400-450
Слабая *Kv* < 0,30	250-350	350-400

Таблица 5А

Средние значения оросительных норм и число поливов при глубоком залегании УГВ (>3 м)

Метеостан-ция	Поливная норма, м^3/га	Оросительная норма (нетто), м^3/га Число поливов					
		5%	25%	50%	75%	85%	95%
Люцерна прошлых лет							
Коломна	300-500	0 0	250 1	600 2	1100 3	1400 3-4	1850 4-5

Изменчивость оросительных норм по территории и во времени обусловливает потребность дифференцированного подхода к выбору года расчетной обеспеченности орошения и разработки поливных режимов в соответствии с конкретным годом увлажнения.

2. **Результаты расчета динамики влагозапасов** почвы для культуры *люцерна прошлых лет* с фактическими суточными метеоданными за сезон 2007 г. на территории Коломенского района (табл. 6А) по компьютерной

программе «Работа в режиме «Рассчитать сезон» (рис. 2А) приведены в табл. 7А.

Таблица 6А

Фактическая метеоинформация по метеостанции Коломна за период май – сентябрь 2007г.

Временной промежуток, ч	T	A	P	V	HF
24	6,95	55,60	0,00	3,25	12
24	5,65	62,40	1,00	1,25	12
24	4,95	77,20	0,40	0,90	12
24	6,65	58,60	0,00	1,10	12
24	4,85	66,40	1,50	1,60	12
24	5,55	50,20	0,00	1,25	12
24	11,45	50,80	0,00	1,60	12
24	10,45	90,90	11,00	1,75	12
24	12,05	74,10	6,00	2,00	12
24	11,95	62,50	0,00	0,90	12
24	12,85	60,50	0,00	1,75	12
24	12,55	80,60	16,80	1,90	12
24	11,85	83,60	1,00	0,75	12
24	13,25	61,20	0,00	0,60	12
24	14,95	62,00	0,00	1,10	12
24	21,75	60,00	0,00	2,00	12
24	20,65	67,40	0,00	1,10	12
24	20,85	66,90	0,00	0,50	12
24	22,25	58,00	0,00	0,90	12
24	22,65	66,50	0,00	0,50	12
24	21,65	68,20	0,00	0,00	12
24	23,15	65,90	0,00	0,40	12
24	24,05	65,60	0,00	0,75	12
24	21,35	67,10	0,00	1,30	12
24	18,85	62,10	0,00	0,90	12
24	21,85	62,60	0,00	0,60	12
24	23,65	67,30	1,00	0,50	12
24	26,35	57,00	0,00	1,00	12
24	25,85	63,60	0,00	1,90	12
24	26,05	70,40	0,00	1,40	12
24	26,65	68,40	0,00	0,40	12
24	21,15	76,20	4,00	2,75	12

Продолжение табл. 6А

Временной промежуток, ч	T	A	P	V	HF
24	14,15	67,00	1,00	2,60	12
24	15,05	61,60	0,00	1,60	12
24	17,35	60,00	0,00	1,40	12
24	17,05	67,10	0,00	1,60	12
24	15,65	66,70	0,00	0,60	12
24	14,75	82,00	4,00	0,60	12
24	15,95	66,60	0,00	1,40	12
24	16,75	64,40	0,80	0,90	12
24	13,85	81,70	2,80	0,50	12
24	12,95	69,10	0,00	0,75	12
24	14,15	60,00	0,00	1,25	12
24	19,85	61,20	0,00	0,75	12
24	23,05	58,60	0,00	1,10	12
24	22,05	70,00	20,00	0,75	12
24	18,65	68,70	0,00	0,60	12
24	19,35	82,75	3,00	0,90	12
24	21,05	77,50	4,00	0,90	12
24	19,95	74,50	0,00	0,75	12
24	19,45	68,60	0,00	1,25	12
24	17,45	66,70	0,00	1,50	12
24	16,55	63,60	0,00	1,25	12
24	16,95	62,60	0,00	0,50	12
24	17,35	64,50	0,00	0,50	12
24	18,55	63,40	0,80	1,10	12
24	19,25	71,60	2,00	1,60	12
24	19,35	78,10	2,00	1,00	12
24	19,85	72,50	2,00	0,75	12
24	17,25	72,90	1,00	0,40	12
24	18,35	77,50	0,40	0,50	12
24	18,25	74,70	0,00	0,50	12
24	18,35	75,00	3,00	0,90	12
24	16,35	89,70	15,00	0,75	12
24	19,35	78,10	0,00	0,60	12
24	21,35	70,40	0,00	0,50	12
24	23,05	65,60	0,00	2,87	12
24	19,35	68,40	0,30	3,40	12
24	18,95	71,90	0,00	1,90	12

Продолжение табл. 6А

Временной промежуток, ч	T	A	P	V	HF
24	16,95	84,40	14,00	1,20	12
24	18,65	72,10	11,00	4,00	12
24	21,15	72,10	0,00	0,90	12
24	24,25	71,20	0,00	0,50	12
24	24,85	72,00	2,00	2,00	12
24	19,55	78,20	3,70	1,10	12
24	19,45	73,40	0,00	0,50	12
24	19,75	70,40	0,50	1,40	12
24	20,15	68,50	0,60	1,75	12
24	21,75	64,10	0,00	1,50	12
24	23,85	67,60	0,00	1,00	12
24	20,15	66,10	0,00	1,60	12
24	19,45	67,60	0,00	2,00	12
24	16,55	63,90	0,00	1,90	12
24	17,45	63,70	0,00	0,40	12
24	20,25	58,40	0,00	0,50	12
24	18,05	77,00	2,50	1,75	12
24	18,35	80,20	8,00	2,30	12
24	16,95	77,70	7,00	2,60	12
24	18,85	78,60	14,30	0,75	12
24	19,45	77,20	6,00	0,50	12
24	21,05	73,60	6,00	0,75	12
24	19,45	80,70	7,00	0,90	12
24	19,35	70,40	7,40	0,90	12
24	17,45	88,70	35,00	1,40	12
24	19,75	88,70	21,00	0,40	12
24	18,25	86,50	1,80	1,50	12
24	19,45	87,60	10,00	0,90	12
24	20,75	73,00	0,30	0,40	12
24	24,05	69,60	0,00	0,60	12
24	22,55	67,60	0,00	1,50	12
24	18,45	66,50	0,00	1,40	12
24	19,45	64,00	0,00	0,75	12
24	21,05	61,50	0,00	0,75	12
24	22,45	63,70	0,00	0,75	12
24	23,45	67,10	0,00	0,50	12
24	24,05	64,00	0,00	1,50	12

Продолжение табл. 6А

Временной промежуток, ч	T	A	P	V	HF
24	23,95	60,90	0,00	1,60	12
24	22,15	73,90	6,40	0,75	12
24	23,75	62,10	0,00	0,75	12
24	24,95	62,00	0,00	0,50	12
24	20,35	83,90	5,60	1,00	12
24	21,25	79,20	0,00	1,10	12
24	25,25	68,90	0,00	0,50	12
24	24,95	65,10	0,00	0,60	12
24	24,75	67,20	0,00	0,00	12
24	25,95	64,60	0,00	1,25	12
24	25,25	74,60	0,00	1,10	12
24	20,95	73,40	0,00	1,40	12
24	18,05	69,70	0,00	1,50	12
24	15,85	66,60	0,00	0,75	12
24	14,85	64,90	1,20	2,10	12
24	12,65	64,60	0,00	1,00	12
24	11,55	78,90	6,00	1,30	12
24	10,05	95,40	9,40	0,60	12
24	11,85	78,70	0,10	0,75	12
24	12,05	72,00	0,00	1,00	12
24	15,05	72,50	0,00	0,50	12
24	16,65	77,60	0,00	0,50	12
24	16,35	67,90	0,00	0,75	12
24	18,25	68,90	0,90	0,90	12
24	11,15	85,40	8,40	2,10	12
24	9,35	93,90	10,00	2,00	12
24	9,35	91,40	2,20	1,10	12
24	9,25	73,50	0,30	1,00	12
24	9,35	72,60	3,00	0,50	12
24	13,05	78,20	21,00	1,10	12
24	11,25	94,60	41,00	1,50	12
24	10,25	89,30	3,70	2,10	12
24	9,05	86,70	1,60	0,90	12
24	9,55	88,70	0,00	2,40	12
24	12,75	83,60	0,00	0,75	12
24	13,75	81,10	3,50	1,10	12
24	12,35	91,90	0,00	1,00	12

Продолжение табл. 6А

Временной промежуток, ч	T	A	P	V	HF
24	9,35	81,50	0,00	0,40	12
24	9,25	84,10	1,60	0,20	12
24	12,85	87,40	0,00	0,00	12
24	12,35	85,30	0,00	0,00	12
24	11,75	91,80	0,00	0,60	12
24	12,95	79,10	0,00	1,25	12
24	13,05	78,60	0,00	0,60	12
24	14,15	82,00	0,00	0,60	12
24	16,05	83,50	0,00	0,60	12
24	15,75	80,00	0,00	0,30	12

Примечание. T – температура, A – влажность воздуха, P – осадки, V – скорость ветра, HF – высота флюгера.

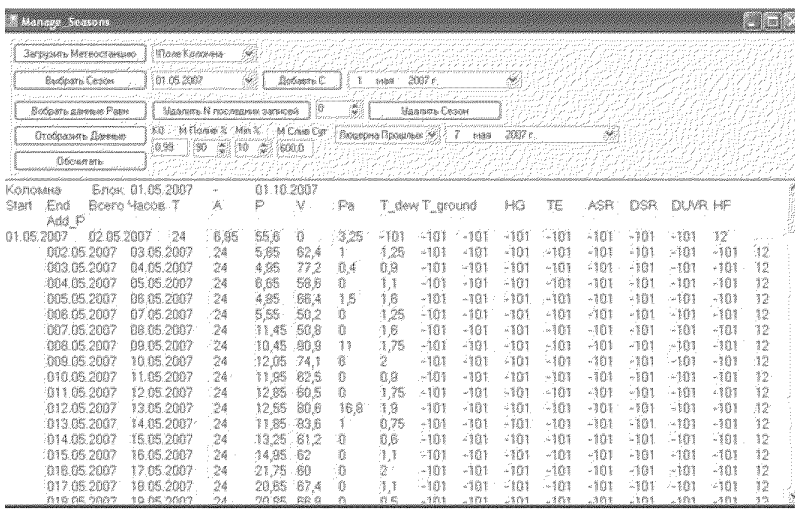


Рис. 2А. Окно программы «Расчет динамики агроклиматических ресурсов и их регулирование» (Raduga Irrigation) с заданными параметрами для расчета в режиме «Рассчитать сезон»

Сумма фактических осадков за вегетацию составила 388,8 мм, что соответствует году 50% обеспеченности (см. рис. 1А).

Таблица 7А

Результаты расчетов по программе (испаряемость E, водопотребление Ev, дефицит водопотребления dEv (мм), AddP – добавлено воды (полив, мм)

Коломна	Блок	01.05.2007	-	01.10.2007						
Start	End	Всего, ч	T	A	P	V	Add_P	E	Ev	dEv
07.05.2007	08.05.2007	24	11,45	50,8	0	1,6	0	3,13	2,67	0
08.05.2007	09.05.2007	24	10,45	90,9	11	1,75	0	0,56	0,47	-7,86
09.05.2007	10.05.2007	24	12,05	74,1	6	2	0	1,78	1,52	-4,48
10.05.2007	11.05.2007	24	11,95	62,5	0	0,9	0	2,25	1,92	0
11.05.2007	12.05.2007	24	12,85	60,5	0	1,75	0	2,76	2,35	0
12.05.2007	13.05.2007	24	12,55	80,6	16,8	1,9	0	1,36	1,15	-11,38
13.05.2007	14.05.2007	24	11,85	83,6	1	0,75	0	0,96	0,82	-0,18
14.05.2007	15.05.2007	24	13,25	61,2	0	0,6	0	2,40	2,05	0
15.05.2007	16.05.2007	24	14,95	62	0	1,1	0	2,74	2,33	0
16.05.2007	17.05.2007	24	21,75	60	0	2	0	4,38	3,73	0
17.05.2007	18.05.2007	24	20,65	67,4	0	1,1	0	3,07	2,61	0
18.05.2007	19.05.2007	24	20,85	66,9	0	0,5	0	2,91	2,48	0
19.05.2007	20.05.2007	24	22,25	58	0	0,9	0	4,13	3,51	0
20.05.2007	21.05.2007	24	22,65	66,5	0	0,5	0	3,18	2,90	0
21.05.2007	22.05.2007	24	21,65	68,2	0	0	0	2,70	2,46	0
22.05.2007	23.05.2007	24	23,15	65,9	0	0,4	0	3,26	2,97	0
23.05.2007	24.05.2007	24	24,05	65,6	0	0,75	0	3,58	3,26	0
24.05.2007	25.05.2007	24	21,35	67,1	0	1,3	0	3,27	2,98	0
25.05.2007	26.05.2007	24	18,85	62,1	0	0,9	0	3,21	2,92	0
26.05.2007	27.05.2007	24	21,85	62,6	0	0,6	0	3,48	3,17	0
27.05.2007	**28.05.2007**	**24**	**23,65**	**67,3**	**1**	**0,5**	**0**	**3,24**	**2,95**	**35,02**
28.05.2007	29.05.2007	24	26,35	57	0	1	35	5,05	5,00	0
29.05.2007	30.05.2007	24	25,85	63,6	0	1,9	0	4,67	4,62	0
30.05.2007	31.05.2007	24	26,05	70,4	0	1,4	0	3,61	3,57	0
31.05.2007	01.06.2007	24	26,65	68,4	0	0,4	0	3,48	3,44	0
01.06.2007	02.06.2007	24	21,15	76,2	4	2,75	0	2,75	2,72	0
02.06.2007	03.06.2007	24	14,15	67	1	2,6	0	2,70	2,68	0
03.06.2007	04.06.2007	24	15,05	61,6	0	1,6	0	2,95	2,92	0
04.06.2007	05.06.2007	24	17,35	60	0	1,4	0	3,36	3,32	0
05.06.2007	06.06.2007	24	17,05	67,1	0	1,6	0	2,79	2,76	0
06.06.2007	07.06.2007	24	15,65	66,7	0	0,6	0	2,33	2,31	0
07.06.2007	08.06.2007	24	14,75	82	4	0,6	0	1,20	1,19	0
08.06.2007	09.06.2007	24	15,95	66,6	0	1,4	0	2,62	2,78	0
09.06.2007	10.06.2007	24	16,75	64,4	0,8	0,9	0	2,73	2,89	0
10.06.2007	11.06.2007	24	13,85	81,7	2,8	0,5	0	1,15	1,22	0

Продолжение табл. 7А

Коломна	Блок	01.05.2007	-	01.10.2007						
Start	End	Всего, ч	T	A	P	V	Add_P	E	Ev	dEv
11.06.2007	12.06.2007	24	12,95	69,1	0	0,75	0	1,92	2,04	0
12.06.2007	13.06.2007	24	14,15	60	0	1,25	0	2,82	2,99	0
13.06.2007	14.06.2007	24	19,85	61,2	0	0,75	0	3,37	3,57	0
14.06.2007	**15.06.2007**	**24**	**23,05**	**58,6**	**0**	**1,1**	**0**	**4,31**	**4,57**	**41,22**
15.06.2007	16.06.2007	24	22,05	70	20	0,75	41	2,87	3,04	-11,89
16.06.2007	17.06.2007	24	18,65	68,7	0	0,6	0	2,53	2,68	0
17.06.2007	18.06.2007	24	19,35	82,75	3	0,9	0	1,49	1,58	0
18.06.2007	19.06.2007	24	21,05	77,5	4	0,9	0	2,10	2,23	-0,52
19.06.2007	20.06.2007	24	19,95	74,5	0	0,75	0	2,23	2,42	0
20.06.2007	21.06.2007	24	19,45	68,6	0	1,25	0	2,85	3,11	0
21.06.2007	22.06.2007	24	17,45	66,7	0	1,5	0	2,84	3,09	0
22.06.2007	23.06.2007	24	16,55	63,6	0	1,25	0	2,89	3,15	0
23.06.2007	24.06.2007	24	16,95	62,6	0	0,5	0	2,75	3,00	0
24.06.2007	25.06.2007	24	17,35	64,5	0	0,5	0	2,66	2,90	0
25.06.2007	26.06.2007	24	18,55	63,4	0,8	1,1	0	3,13	3,41	0
26.06.2007	27.06.2007	24	19,25	71,6	2	1,6	0	2,66	2,90	0
27.06.2007	28.06.2007	24	19,35	78,1	2	1	0	1,92	2,09	0
28.06.2007	29.06.2007	24	19,85	72,5	2	0,75	0	2,39	2,60	0
29.06.2007	30.06.2007	24	17,25	72,9	1	0,4	0	2,00	2,17	0
30.06.2007	01.07.2007	24	18,35	77,5	0,4	0,5	0	1,77	1,44	0
01.07.2007	02.07.2007	24	18,25	74,7	0	0,5	0	1,98	1,61	0
02.07.2007	03.07.2007	24	18,35	75	3	0,9	0	2,07	1,68	0
03.07.2007	04.07.2007	24	16,35	89,7	15	0,75	0	0,76	0,62	0
04.07.2007	05.07.2007	24	19,35	78,1	0	0,6	0	1,82	1,48	0
05.07.2007	06.07.2007	24	21,35	70,4	0	0,5	0	2,66	2,16	0
06.07.2007	07.07.2007	24	23,05	65,6	0	2,87	0	4,36	3,54	0
07.07.2007	08.07.2007	24	19,35	68,4	0,3	3,4	0	3,60	2,92	0
08.07.2007	09.07.2007	24	18,95	71,9	0	1,9	0	2,69	2,18	0
09.07.2007	10.07.2007	24	16,95	84,4	14	1,2	0	1,25	1,02	0
10.07.2007	11.07.2007	24	18,65	72,1	11	4	0	3,25	2,83	0
11.07.2007	12.07.2007	24	21,15	72,1	0	0,9	0	2,62	2,28	0
12.07.2007	13.07.2007	24	24,25	71,2	0	0,5	0	2,92	2,54	0
13.07.2007	14.07.2007	24	24,85	72	2	2	0	3,49	3,04	0
14.07.2007	15.07.2007	24	19,55	78,2	3,7	1,1	0	1,95	1,70	0
15.07.2007	16.07.2007	24	19,45	73,4	0	0,5	0	2,20	1,91	0
16.07.2007	17.07.2007	24	19,75	70,4	0,5	1,4	0	2,77	2,42	0
17.07.2007	18.07.2007	24	20,15	68,5	0,6	1,75	0	3,13	2,73	0
18.07.2007	19.07.2007	24	21,75	64,1	0	1,5	0	3,72	3,24	0
19.07.2007	20.07.2007	24	23,85	67,6	0	1	0	3,45	3,00	0

Продолжение табл. 7А

Коломна	Блок	01.05.2007	-	01.10.2007						
Start	End	Всего, ч	T	A	P	V	Add_P	E	Ev	dEv
20.07.2007	21.07.2007	24	20,15	66,1	0	1,6	0	3,31	3,28	0
21.07.2007	22.07.2007	24	19,45	67,6	0	2	0	3,21	3,18	0
22.07.2007	23.07.2007	24	16,55	63,9	0	1,9	0	3,09	3,06	0
23.07.2007	24.07.2007	24	17,45	63,7	0	0,4	0	2,70	2,67	0
24.07.2007	25.07.2007	24	20,25	58,4	0	0,5	0	3,56	3,53	0
25.07.2007	26.07.2007	24	18,05	77	2,5	1,75	0	2,08	2,06	0
26.07.2007	27.07.2007	24	18,35	80,2	8	2,3	0	1,93	1,91	0
27.07.2007	28.07.2007	24	16,95	77,7	7	2,6	0	2,10	2,08	0
28.07.2007	29.07.2007	24	18,85	78,6	14,3	0,75	0	1,78	1,76	0
29.07.2007	30.07.2007	24	19,45	77,2	6	0,5	0	1,88	1,86	0
30.07.2007	31.07.2007	24	21,05	73,6	6	0,75	0	2,42	2,63	0
31.07.2007	01.08.2007	24	19,45	80,7	7	0,9	0	1,68	1,83	-4,07
01.08.2007	02.08.2007	24	19,35	70,4	7,4	0,9	0	2,56	2,79	-4,61
02.08.2007	03.08.2007	24	17,45	88,7	35	1,4	0	0,95	1,04	-33,96
03.08.2007	04.08.2007	24	19,75	88,7	21	0,4	0	0,93	1,02	-19,98
04.08.2007	05.08.2007	24	18,25	86,5	1,8	1,5	0	1,20	1,30	-0,50
05.08.2007	06.08.2007	24	19,45	87,6	10	0,9	0	1,08	1,17	-8,83
06.08.2007	07.08.2007	24	20,75	73	0,3	0,4	0	2,33	2,54	0
07.08.2007	08.08.2007	24	24,05	69,6	0	0,6	0	3,10	3,37	0
08.08.2007	09.08.2007	24	22,55	67,6	0	1,5	0	3,47	3,78	0
09.08.2007	10.08.2007	24	18,45	66,5	0	1,4	0	2,96	2,40	0
10.08.2007	11.08.2007	24	19,45	64	0	0,75	0	3,07	2,49	0
11.08.2007	12.08.2007	24	21,05	61,5	0	0,75	0	3,53	2,86	0
12.08.2007	13.08.2007	24	22,45	63,7	0	0,75	0	3,53	2,87	0
13.08.2007	14.08.2007	24	23,45	67,1	0	0,5	0	3,23	2,62	0
14.08.2007	15.08.2007	24	24,05	64	0	1,5	0	4,10	3,33	0
15.08.2007	16.08.2007	24	23,95	60,9	0	1,6	0	4,49	3,64	0
16.08.2007	17.08.2007	24	22,15	73,9	6,4	0,75	0	2,51	2,03	0
17.08.2007	18.08.2007	24	23,75	62,1	0	0,75	0	3,89	3,16	0
18.08.2007	19.08.2007	24	24,95	62	0	0,5	0	3,96	3,45	0
19.08.2007	20.08.2007	24	20,35	83,9	5,6	1	0	1,48	1,29	0
20.08.2007	21.08.2007	24	21,25	79,2	0	1,1	0	2,01	1,75	0
21.08.2007	22.08.2007	24	25,25	68,9	0	0,5	0	3,28	2,86	0
22.08.2007	23.08.2007	24	24,95	65,1	0	0,6	0	3,69	3,21	0
23.08.2007	24.08.2007	24	24,75	67,2	0	0	0	3,17	2,76	0
24.08.2007	25.08.2007	24	25,95	64,6	0	1,25	0	4,22	3,68	0
25.08.2007	26.08.2007	24	25,25	74,6	0	1,1	0	2,89	2,52	0
26.08.2007	27.08.2007	24	20,95	73,4	0	1,4	0	2,63	2,29	0
27.08.2007	28.08.2007	24	18,05	69,7	0	1,5	0	2,66	2,63	0

Продолжение табл. 7А

Коломна	Блок	01.05.2007	-	01.10.2007						
Start	End	Всего, ч	T	A	P	V	Add_P	E	Ev	dEv
28.08.2007	29.08.2007	24	15,85	66,6	0	0,75	0	2,41	2,38	0
29.08.2007	30.08.2007	24	14,85	64,9	1,2	2,1	0	2,82	2,80	0
30.08.2007	31.08.2007	24	12,65	64,6	0	1	0	2,24	2,21	0
31.08.2007	01.09.2007	24	11,55	78,9	6	1,3	0	1,30	1,29	0
01.09.2007	02.09.2007	24	10,05	95,4	9,4	0,6	0	0,24	0,24	0
02.09.2007	03.09.2007	24	11,85	78,7	0,1	0,75	0	1,25	1,24	0
03.09.2007	04.09.2007	24	12,05	72	0	1	0	1,71	1,70	0
04.09.2007	05.09.2007	24	15,05	72,5	0	0,5	0	1,84	1,83	0
05.09.2007	06.09.2007	24	16,65	77,6	0	0,5	0	1,62	1,61	0
06.09.2007	07.09.2007	24	16,35	67,9	0	0,75	0	2,37	2,35	0
07.09.2007	08.09.2007	24	18,25	68,9	0,9	0,9	0	2,56	2,54	0
08.09.2007	09.09.2007	24	11,15	85,4	8,4	2,1	0	0,97	0,96	0
09.09.2007	10.09.2007	24	9,35	93,9	10	2	0	0,36	0,36	0

Согласно расчету по фактическим метеоданным и заданным условиям люцерна прошлых лет в течение вегетации 2007 г. дважды нуждалась в поливе (положительный дефицит): 27 мая (дефицит 35 мм) и 14 июня (дефицит 41 мм) (см. табл. 7А). Отрицательное значение дефицита означает излишки влаги, образующие поверхностный сток. При нулевом значении дефицита полив не нужен.

Общий дефицит водопотребления составил 76 мм (760 м^3/га), что соответствует году 50% обеспеченности при расчете вероятностных параметров орошения для люцерны (п. 1 расчета приложения).

Результаты расчета динамики влагозапасов используются при составлении графиков поливов (рис. 3А).

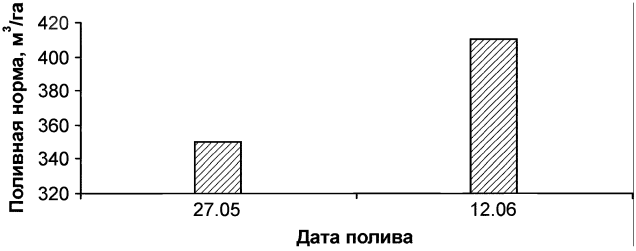


Рис. 3А. График поливов люцерны

СОДЕРЖАНИЕ

Введение ... 3
1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕЛИОРАЦИИ ... 5
1.1. Научно-технические разработки в области информационных технологий планирования водопользования ... 5
1.2. Концепция совершенствования методов планирования орошения и водопользования ... 10
2. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ОРОШЕНИЯ ... 21
2.1. Расчет режимов орошения по многолетним данным гидрометеорологических наблюдений ... 21
2.2. Оперативное планирование режимов орошения ... 42
3. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИГОДОВОГО И СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В МНОГОЛЕТНЕМ ПЕРИОДЕ ... 46
3.1. Результаты исследований и прогноз изменения климата в многолетнем периоде ... 46
3.2. Закономерности циклического характера динамики климатических факторов в многолетнем разрезе ... 50
4. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ДАННЫХ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОРОШЕНИЯ ... 60
4.1. Информация для планирования режимов орошения ... 60
4.2. База данных для расчета оросительных норм ... 64
5. ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛИВОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ... 85
5.1. Информационно-советующая система планирования водопользования. Основные компоненты ИСС ... 87
5.2. Исходные требования к ИСС ... 93
5.3. Компьютерная программа оперативного планирования поливов ... 102
6. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОЛИВА ... 110
7. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ... 122

8. ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ОРОШЕНИЯ 139
8.1. Основные принципы оценки эколого-экономической эффективности 139
8.2. Расчет эколого-экономической эффективности 142
8.3. Учет факторов неопределенности и риска в расчетах эколого-экономической эффективности 146
ЛИТЕРАТУРА 151
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Пример расчета 159

ПЛАНИРОВАНИЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Редакторы: *Л.Т. Мехрадзе, В.И. Сидорова*
Художественный редактор *Л.А. Жукова*
Обложка художника *П.В. Жукова*
Компьютерная верстка *Т.В. Морозовой*
Корректоры: *Н.А. Буцко, С.И. Ермакова, В.А. Суслова*

fgnu@rosinformagrotech.ru

Подписано в печать 17.04.2014 Формат 60x84/16
Печать офсетная Бумага офсетная Гарнитура шрифта Times New Roman
Печ. л. 10,75 Тираж 300 экз. Изд. заказ 35 Тип. заказ 140

Отпечатано в типографии ФГБНУ "Росинформагротех",
141261, пос. Правдинский Московской обл., ул. Лесная, 60

ISBN 978-5-7367-1023-2



gost.e-ecolog.ru