

На правах рукописи

**Ольгаренко Владимир Игоревич**

**УПРАВЛЕНИЕ ОРОШЕНИЕМ КАРТОФЕЛЯ ЛЕТНЕГО СРОКА  
ПОСАДКИ НА ПОЙМЕННЫХ ЗЕМЛЯХ НИЖНЕГО ДОНА**

специальность: 06.01.02 – «Мелиорация, рекультивация и охрана земель»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Саратов 2016

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Научный руководитель:

**Бабичев Александр Николаевич,**  
кандидат сельскохозяйственных наук

Официальные оппоненты:

**Юрченко Ирина Фёдоровна,**  
доктор технических наук, профессор, лаборатория информационных технологий ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова», заведующая  
**Ахмедов Аскар Джангир оглы,**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кафедра «Землеустройство и кадастры», профессор

**Ведущая организация** – ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»

Защита диссертации состоится « 30 » сентября 2016 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» по адресу 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325 им. А. В. Дружкина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru)

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., д. 1., E-mail: [dissovet01@sgau.ru](mailto:dissovet01@sgau.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Дмитрий Анатольевич Маштаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Площадь пойменных земель Нижнего Дона составляет 280 тыс. га, под сельскохозяйственные нужды отведено 60 тыс. га, из которых 10 тыс. га на орошении. Важное значение в дальнейшем развитии агропромышленного комплекса Ростовской области является повышение эффективности использования пойменных земель и прежде всего на орошении. В этих условиях производство картофеля летнего срока посадки является одним из приоритетных направлений развития сельского хозяйства. Возделывание картофеля в условиях дефицита водных ресурсов должно базироваться на обосновании и реализации процессов управления орошением, которые обеспечивают повышение точности и надёжности параметров модели эвапотранспирации на основе создания информационной базы данных; увеличивают урожайность при экономном использовании водных и других ресурсов, улучшают экологическое состояние мелиорируемого фонда. Научно-исследовательская работа осуществлялась согласно тематическому плану ФГБНУ «РосНИИПМ» (№ гос. рег. 115022410032) по теме: «Провести исследования и разработать рекомендации по повышению эффективности использования земельных ресурсов на основе ресурсосберегающих технологий орошения и повышения биопотенциала сельскохозяйственных культур».

**Степень разработанности темы.** Проведённый научно-аналитический анализ показал, что по вопросам определения водопотребления, режимов орошения и питания картофеля в настоящее время имеется обширная информация. Однако требуется обоснование, разработка и реализация новых расчётных моделей на основе повышения точности управления процессами водопотребления с учётом использования информационных технологий, динамики изменения гидрометеорологических факторов и влажности почвы в расчётном слое, обеспечивающих рациональное использование водных и энергетических ресурсов, высокую продуктивность возделывания картофеля, сохранение и повышение плодородия почвы, создания благоприятной экологической обстановки в орошаемом агроландшафте.

**Цель исследований** - повышение эффективности использования водных и энергетических ресурсов на основе разработки информационной базы данных, модели управления орошением картофеля летнего срока посадки для условий пойменных земель Нижнего Дона.

**Задачи исследований:**

- провести анализ существующих методов управления орошением картофеля и научно обосновать основные направления их совершенствования на пойменных землях Нижнего Дона;
- разработать информационную базу данных по управлению водопотреблением и режимом орошения картофеля как при нормативной влагообеспеченности, так и заданных уровней дефицитов на водные и питательные режимы;

- установить динамику водного баланса, эвапотранспирацию, потенциальную эвапотранспирацию и урожайность картофеля при различных режимах орошения и изменчивости гидрометеорологических факторов;

- усовершенствовать модель определения эвапотранспирации и управления орошением картофеля с учётом повышения качества информационной базы данных, влияния фактической изменчивости гидрометеорологических условий, влажности почвы и уровня урожайности;

- разработать алгоритм, функциональную структуру и компьютерную программу для управления орошением картофеля летнего срока посадки;

- выполнить оценку экономической и энергетической эффективности возделывания картофеля при орошении с учётом структуры ресурсозатрат.

**Научная новизна заключается в том, что:**

- разработана информационная база данных по управлению водопотреблением и режимом орошения картофеля как при нормативной влагообеспеченности, так и заданных уровней дефицитов на водные и питательные режимы;

- установлены структура водного баланса орошаемого поля картофеля, эмпирические зависимости эвапотранспирации, потенциальной эвапотранспирации и урожайности в зависимости от режима орошения и динамики гидрометеопараметров для лет различной водообеспеченности;

- разработаны алгоритм, функциональная структура и компьютерная программа управления орошением картофеля летнего срока посадки, обеспечивающие значительное повышение точности определения параметров исследуемых моделей, эффективность использования оросительной воды и энергетических ресурсов;

- усовершенствована модель определения эвапотранспирации и управления орошением картофеля на основе полученных нелинейных эмпирических зависимостей; разработан экономически обоснованный режим орошения картофеля, обеспечивающий экономию водных и энергетических ресурсов до 20 %.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработана информационная база данных для управления орошением картофеля как при нормативной влагообеспеченности, так и планируемых уровней дефицитов на водные и питательные режимы. Получены эмпирические зависимости влияния метеорологических условий на элементы водного баланса орошаемого поля, эвапотранспирацию, водный и питательный режимы почвы, потенциальную эвапотранспирацию и урожайность культур, изменение биоклиматических коэффициентов от фактических почвенных влагозапасов картофеля для года расчётной обеспеченности. Разработаны: модель расчёта эвапотранспирации орошаемого поля картофеля с учётом динамики изменения почвенных влагозапасов, что повышает точность определения изучаемых параметров до 25 %; алгоритм и программа управления орошением с использованием разработанной модели определения эвапотранспирации; предложен экономически обоснованный режим орошения картофеля, позволяющий экономить водные и энергетические ресурсы до 20 %. Практическое значение результатов исследований обусловлено повышением точности опреде-

ления необходимых параметров, экономией водных и энергетических ресурсов, повышением продуктивности картофеля более чем на 30 %, улучшением экологической обстановки на орошаемых землях.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой послужили системный подход в изучении существующих методов управления орошением сельскохозяйственных культур, методы системного анализа и эмпирического обобщения. Теоретической базой исследований являются работы отечественных научных центров: ФГБНУ «ВНИИГиМ», ФГБОУ ВО «Волгоградский ГАУ», ФГБНУ «РосНИИПМ», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», НИМИ – филиал ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» и соответствующих научно-исследовательских институтов РАН и других ведомств; ряда отечественных и зарубежных авторов в данном направлении исследований. Эмпирическую базу исследований составили результаты полевых исследований на пойменных землях Нижнего Дона, анализ и обобщение полученных результатов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- информационная база данных по управлению водопотреблением и режимом орошением картофеля, включающая комплекс полученных закономерностей для совершенствования моделей расчёта водопотребления при нормативной водообеспеченности и планируемых дефицитах на водные и питательные ресурсы;
- полученные закономерности динамики водного баланса, эвапотранспирации, потенциальной эвапотранспирации и урожайности картофеля при различном уровне режимов орошения и изменчивости гидрометеорологических факторов;
- алгоритм, функциональная структура и компьютерная программа для управления орошением картофеля летнего срока посадки;
- модель определения эвапотранспирации и управления орошением картофеля с учётом повышения качества информационной базы данных, влияния фактической изменчивости гидрометеорологических условий, влажности почвы и уровня урожайности, на основании чего обеспечена экономия водных и энергетических ресурсов до 20 %.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается большим объёмом полученного экспериментального материала, достаточно хорошим совпадением теоретических и практических разработок, применением современных стандартных методов и методик при организации и проведении полевых опытов, апробацией результатов исследований в производственных условиях. Основные результаты диссертационной работы обсуждены и одобрены на международных и межвузовских научно-практических конференциях как в нашей страны, так и ближнем зарубежье, проводимых в ФГБНУ «РосНИИПМ» (г. Новочеркасск), ГНУ «ПНИИАЗ» (г. Москва), ВГУП «ВНИИА» (г. Москва), ГУ «ИОЗ НААН» (г. Херсон, Украина), ФГБОУ ВО «Волгоградский ГАУ» (г. Волгоград), ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ им. императора Петра I» (г. Воронеж), РУП «Институт Овощеводства» (п. Самохваловичи, Беларусь), ФГБОУ ВО «КубГАУ» (г. Краснодар), а также на

международной научно-практической конференции Минобрнауки Российской Федерации за 2013–2015 гг.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 3 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Общий объём публикаций составляет 7,3 п.л., из них 6,1 п.л. принадлежит лично автору.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа изложена на 143 страницах, включает 30 таблиц, 25 рисунков и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Список литературы включает 238 источников, в том числе 19 на иностранном языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во «Введении»** изложены актуальность и степень разработанности решаемой проблемы; обоснованы цель, задачи, методика и новизна исследований; показана теоретическая и практическая значимость работы; заявлены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе** «Особенности возделывания картофеля летнего срока посадки на пойменных землях Нижнего Дона» выполнен анализ информационно-аналитических исследований, изучены работы по определению водопотребления сельскохозяйственных культур, рационального использования водных ресурсов, управления технологическим процессом орошения с применением методов математического моделирования (М. С. Григорова, И. П. Кружилина, В. П. Остапчика, Б. Б. Шумакова, И. С. Шатилова, В. Н. Щедрина и других)

Анализ литературных источников обосновывает необходимость проведения теоретического обоснования и разработке ключевых направлений экспериментальных исследований, обеспечивающий повышение научно-методического уровня управления орошением для условий нормативной влагообеспеченности и заданных дефицитов на водный и питательный режимы картофеля с учётом фактической пространственно-временной изменчивости гидрометеопараметров и влажности в расчётном слое почвы для лет характерных обеспеченностей по дефициту водного баланса.

**Во второй главе** «Почвенно-климатические условия, схема и методика проведения исследований» приведена почвенно-климатическая характеристика экспериментального участка (таблицы 1, 2), программа и методика проведения исследований. Опытный участок расположен в Октябрьском районе Ростовской области в ООО «Агропредприятие «Бессергеновское» в пределах поймы Нижнего Дона. Почвенный покров однороден и представлен лугово-чернозёмными почвами разного гранулометрического состава. Верхние 80-см слои представлены глинами, в северо-западной части массива тяжелыми; по остальной территории лёгкими и средними. По морфологическому строению почвенный покров однороден, верхний слой 0–40 см лугово-черноземных почв незасолен, неосолонцован и не подвержен процессам ощелачивания.

Таблица 1 – Основные показатели питательных веществ почвы опытного участка

Горизонт отбора образцов, см	Наличие веществ в почве			
	Нитраты, мг/кг	Фосфор подвижный, мг/кг	Калий обменный, мг/кг	Гумус, %
0–25	18,2	27,6	378	4,75
25–40	15,1	15,4	285	3,74
40–60	21,9	8,0	209	2,81
60–80	17,0	5,9	214	1,66
80–100	6,9	4,4	202	1,12
25–60	18,5	11,7	247	3,30
0–100	15,8	12,3	258	2,82

Таблица 2 – Водно-физические характеристики почвы опытного участка

Слой почвы, м	Плотность скелета, т/м <sup>3</sup>	Удельная масса, т/м <sup>3</sup>	Скважность, %	Максимальная гигроскопичность, %	НВ, в % от массы сухой почвы
0-0,1	1,23	2,53	53,3	12,42	29,2
0,1-0,2	1,24	2,54	52,7	11,63	28,3
0,2-0,3	1,26	2,53	50,9	10,97	28,7
0,3-0,4	1,35	2,52	47,3	10,32	27,9
0,4-0,5	1,38	2,54	47,2	10,31	26,6
0,5-0,6	1,40	2,56	46,9	10,31	25,6
0,6-0,7	1,42	2,55	46,8	10,32	24,8
0,7-0,8	1,44	2,53	44,6	10,31	24,4
0,8-0,9	1,45	2,55	44,6	10,02	24,0
0,9-1,0	1,46	2,56	44,1	9,82	23,8
0-0,6	1,31	2,53	49,7	10,99	27,7
0-1,0	1,36	2,54	47,8	10,64	26,3

Анализ почвенных образцов показывает, что пахотный слой почвы опытного участка (0–25 см) характеризуется очень низким содержанием нитратов (18,2 мг/кг почвы), низким содержанием подвижного фосфора (27,6 мг/кг почвы) и повышенным содержанием обменного калия (378 мг/кг почвы). Подпахотный слой почвы (25–60 см) характеризуется очень низким содержанием азота и фосфора (18,5 и 11,7 мг/кг почвы соответственно); высоким содержанием калия (247 мг/кг почвы), что объясняется наличием этого элемента в породах, на которых сформировались эти почвы.

Вегетационные периоды характеризуются по дефициту естественного увлажнения как «средневлажный», «средний» и «среднесухой» – гидротермические коэффициенты (ГТК) приняли значения 1,10, 0,65 и 0,27, соответственно за 2012, 2013, 2014 годы.

Программа исследований предусматривала проведение двух полевых опытов в трёхкратной повторности каждый с размещением опытных делянок систе-

матическим методом. Размеры делянки – прямоугольные: 4,2x20 (6 рядков, ширина между рядов 70 см, длина 20 м). Величина защитных полос и расстояние между вариантами составляли по 2 м; площадь учётной делянки – 84,0 м<sup>2</sup>; опытной – 196,8 м<sup>2</sup>. На опыте № 2 расстояние между вариантами и величина защитных полос, в соответствии со стандартными методиками для сохранения принципа единственного различия при постановке опыта, были увеличены до 8 и 25 м соответственно, а площадь опытной делянки составила – 1951,4 м<sup>2</sup> (рисунок 1). Поливы проводились дождевальными машинами «Фрегат» ДМУ-Б-488-90. Исследования проводились в соответствии с действующими нормативами, стандартами, методиками, сертифицированными приборами и оборудованием.

**Опыт 1** – «Изучить закономерности влияния уровня минерального питания на продуктивность картофеля летнего срока посадки при нормативной влагообеспеченности». Опыт включал шесть вариантов: *вариант № 1* – расчётная доза минерального питания (N<sub>150</sub>P<sub>170</sub>K<sub>95</sub>) на планируемую урожайность картофеля 40 т/га, сорта «Беллароза», контроль; *вариант № 2* – доза уменьшена на 15 %; *вариант № 3* – доза уменьшена на 30 %; *вариант № 4* – доза уменьшена на 45 %;

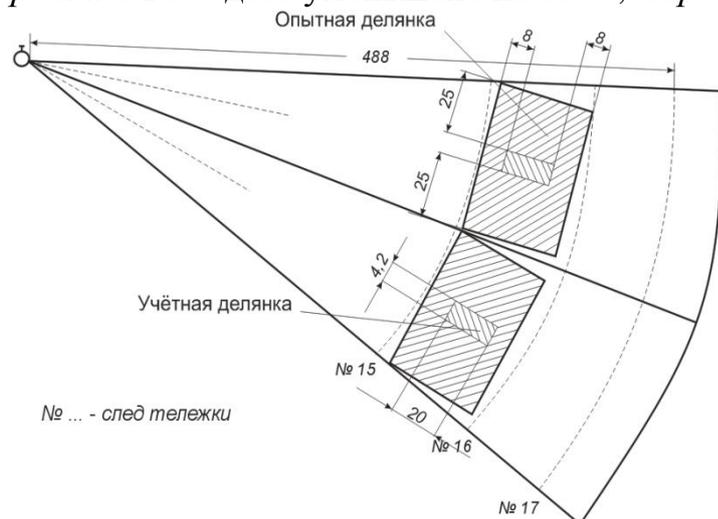


Рисунок 1 – Схема расположения опытных делянок для условий опыта № 2

вариант № 5 – доза увеличена на 15 %; вариант № 6 – доза увеличена на 30 %. Нормативная величина поливной нормы была рассчитана по модели А. Н. Костякова с предположительным порогом влажности – 80 % НВ в слое 0,6 м.

**Опыт 2.** «Изучить водопотребление, режим орошения и эффективность возделывания картофеля летнего срока посадки при различных уровнях влагообеспеченности в расчётном слое почвы». Опыт включал четыре варианта, на каждом из которых поддерживался один уровень минерального питания – расчётной дозой N<sub>150</sub>P<sub>170</sub>K<sub>95</sub> под планируемую урожайность картофеля 40,0 т/га. *Вариант № 1* – вегетационные поливы проводились расчётной поливной нормой (*m*) в спектре изменения влажности в расчётном слое почвы 0,6 м в пределах (0,8–1,0) НВ («М»), контроль. *Вариант № 2* – поливные нормы (*m*) увеличены на 20 % от расчётной («1,2 М»). На *вариантах № 3 и № 4* – поливные нормы (*m*) снижены, соответственно на 20 % («0,8 М») и 40 % («0,6 М») от расчётной. Поливы по рассматриваемым вариантам опыта проводились в одни и те же сроки.

**В третьей главе** «Теоретическое обоснование и разработка информационной базы данных для управления орошением картофеля» дано теоретическое обоснование модели управления орошением сельскохозяйственных культур; изложены результаты экспериментальных исследований: по изучению влияния эва-

потранспирации, изменения режима орошения, питания, качественных характеристик на продуктивность возделывания картофеля.

Проведённый учёными ЮжНИИГиМа (РосНИИППМ) и НИМИ (НГМА-НИМИ «ДонГау») ретроспективный анализ позволил установить величины парных коэффициентов корреляции фактических значений величин эвапотранспирации, оросительных норм и урожайности, полученных в результате многолетних полевых экспериментов, с соответствующими показателями, измеряемыми на метеостанциях (таблица 3).

Таблица 3 – Парные коэффициенты суммарного испарения, оросительной нормы и урожайности с основными метеорологическими параметрами

Показатели	$E_{\omega}$	$t$	$d_{\varphi}$	$P$	$ET - P$	$ET$	$M$	$Y$
$E_{\omega}$	–	0,90	0,94	0,81	0,83	0,96	0,74	0,76
$t$	0,90	–	0,80	0,82	0,90	0,73	0,58	0,09
$d_{\varphi}$	0,94	0,80	–	0,74	0,89	0,82	0,72	0,13
$P$	0,81	0,82	0,74	–	0,92	0,20	0,65	0,10
$(ET - P)$	0,83	0,90	0,89	0,92	–	0,93	0,98	0,70
$ET$	0,96	0,73	0,82	0,20	0,93	–	0,78	0,86
$M$	0,74	0,58	0,72	0,65	0,98	0,78	–	0,51
Стандартное отклонение	83,0	178,3	178	57,8	97,9	77,2	112,0	7,0
Коэффициент вариации, $V\%$	10,4	6,4	7,3	30,6	12,0	12,1	33,0	12,0

Анализ показывает, что наиболее высокая взаимосвязь эвапотранспирации с потенциальной эвапотранспирацией, коэффициент корреляции которой составляет 0,96. Весьма существенна взаимосвязь урожайности сельскохозяйственных культур с эвапотранспирацией и потенциальной эвапотранспирацией, коэффициенты корреляции составляют 0,86 и 0,76, соответственно. Зависимость урожайности от оросительной нормы для условий точного управления орошением весьма слабая – 0,51.

Разработана функциональная структура комплекса задач управления орошением, обеспечивающая реализацию основных процессов управления в едином информационном пространстве (рисунок 2).

Анализ данных о проведённых исследованиях по изучению темпов нарастания площади листовой поверхности картофеля по фазам роста и развития в зависимости от уровней минерального питания показал, что лучший темп прироста наблюдался на варианте  $N_{194}P_{220}K_{123}$  (увеличение дозы на 30 % от расчётной) соответственно от 39,4 до 41,4 и от 54,3 до 55,8 тыс.  $m^2/га$  за рассматриваемые годы исследований; наименьшие показатели на варианте  $N_{84}P_{95}K_{53}$  (снижение дозы на 45 % от расчётной) соответственно от 27,6 до 30,0 и от 35,1 до 38,1 тыс.  $m^2/га$  за рассматриваемые годы исследований; на варианте  $N_{150}P_{170}K_{95}$  (контроль) соответственно от 35,7 до 37,2 и от 52,0 до 53,1 тыс.  $m^2/га$  за рассматриваемые годы исследований.

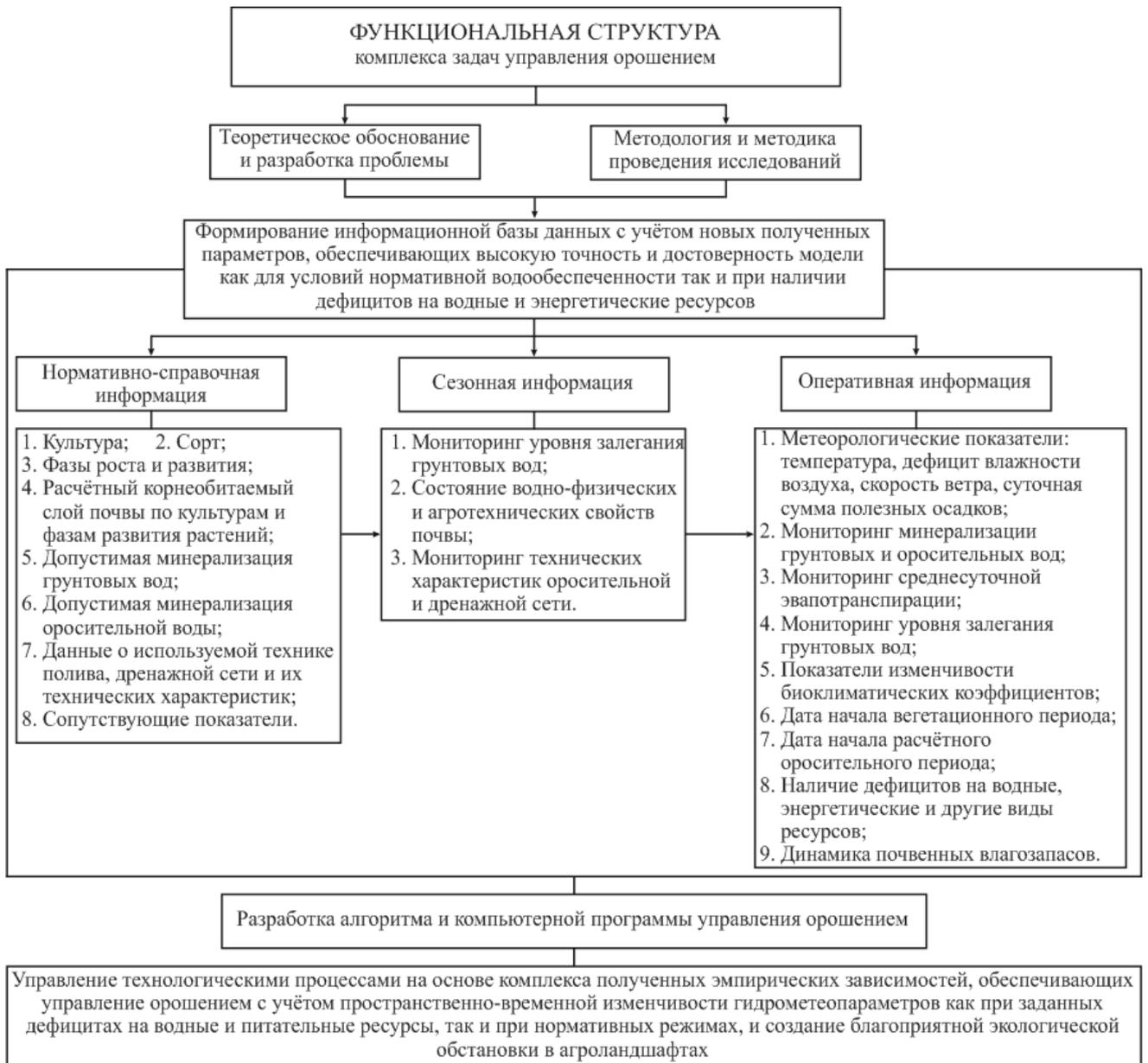


Рисунок 2 – Функциональная структура комплекса задач управления орошением

Установлены эмпирические зависимости темпов прироста массы клубней и нарастания площади листовой поверхности картофеля по фазам его развития в зависимости от расчётных доз минерального питания растений (рисунок 3), описываемые полиномиальными зависимостями второй степени, с соответствующими эмпирическими коэффициентами (таблица 4):

$$S_{Л.Д.} = f(T_{В.П.}) = -A_{S1} \cdot T_{В.П.}^2 + A_{S2} \cdot T_{В.П.} + A_{S3} , \quad (3)$$

$$У_{Д} = f(T_{В.П.}) = -A_{У1} \cdot T_{В.П.}^2 + A_{У2} \cdot T_{В.П.} - A_{У3} , \quad (4)$$

где  $S_{Л.Д.}$  – площадь листовой поверхности, тыс. м<sup>2</sup>/га;  $У_{Д}$  – урожайность картофеля, т/га;  $T_{В.П.}$  – продолжительность вегетационного периода, сут;  $A_{S1}, A_{S2}, A_{S3}, A_{У1}, A_{У2}, A_{У3}$  – коэффициенты установленных эмпирических зависимостей.

(а)

(б)

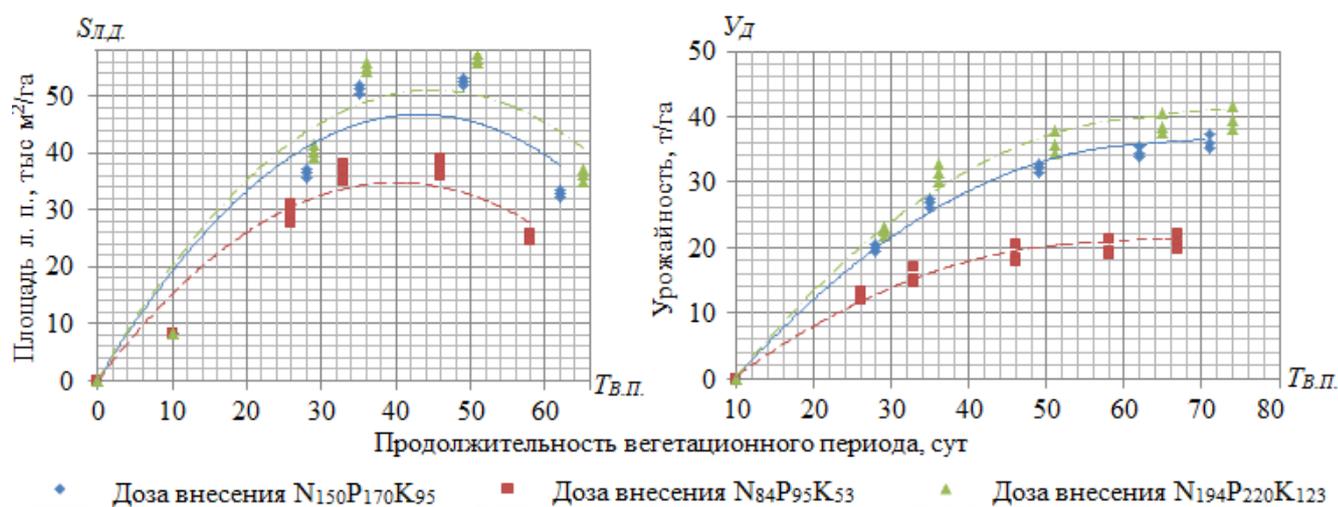


Рисунок 3 –Динамика нарастания площади листовой поверхности картофеля (а) и прироста массы клубней (б) за период вегетации при расчётных дозах минерального питания, 2012–2014 гг.

Таблица 4 – Эмпирические коэффициенты зависимостей (3), (4)

Варианты опыта	Коэффициенты уравнений			Коэффициент аппроксимации $R^2$ , $S_{л.д.}/U_{д}$
	$A_{S1}/A_{Y1}$	$A_{S2}/A_{Y2}$	$A_{S3}/A_{Y3}$	
N <sub>150</sub> P <sub>170</sub> K <sub>95</sub>	0,025 / 0,012	2,166 / 1,544	0 / 13,887	0,89 / 0,99
N <sub>128</sub> P <sub>145</sub> K <sub>81</sub>	0,023 / 0,011	1,998 / 1,404	0 / 12,539	0,91 / 0,96
N <sub>106</sub> P <sub>120</sub> K <sub>67</sub>	0,022 / 0,010	1,867 / 1,239	0 / 11,101	0,92 / 0,96
N <sub>84</sub> P <sub>95</sub> K <sub>53</sub>	0,022 / 0,009	1,735 / 1,028	0 / 8,935	0,90 / 0,97
N <sub>172</sub> P <sub>195</sub> K <sub>109</sub>	0,024 / 0,012	2,169 / 1,601	0 / 13,796	0,91 / 0,97
N <sub>194</sub> P <sub>220</sub> K <sub>123</sub>	0,025 / 0,013	2,266 / 1,714	0 / 15,450	0,93 / 0,98

Анализ данных показывает, что урожайность картофеля составила: на варианте N<sub>194</sub>P<sub>220</sub>K<sub>123</sub> – 39,7 т/га, что на 3,4 т/га (или 9,3 %) выше показателей контрольного варианта в среднем за годы исследований; на варианте N<sub>84</sub>P<sub>95</sub>K<sub>53</sub> – 20,7 т/га, что на 15,6 т/га (или 42,9 %) ниже показателей контрольного варианта.

В результате проведённых исследований установлена также общая эмпирическая зависимость динамики урожайности картофеля от внесения различных доз минерального питания, описываемая степенной зависимостью:

$$U_{д} = 2,109 \cdot \sum NPK^{0,554}, R^2 = 0,97 \quad (5)$$

где  $U_{д}$  – урожайность картофеля при внесении различных доз минерального питания, т/га;  $\sum NPK$  – суммарная доза удобрений, (кг д.в.)/га.

Установлены эмпирические зависимости темпов прироста массы клубней и нарастания площади листовой поверхности картофеля по фазам его развития в зависимости от различных оросительных норм (рисунок 4), описываемые полиномиальными зависимостями второй степени, с соответствующими эмпирическими коэффициентами (таблица 5) и имеют вид:

$$S_{л.о.} = f(T_{в.п.}) = -A_{S1} \cdot T_{в.п.}^2 + A_{S2} \cdot T_{в.п.} + A_{S3}, \quad (6)$$

$$U_{ф} = f(T_{в.п.}) = -A_{Y1} \cdot T_{в.п.}^2 + A_{Y2} \cdot T_{в.п.} - A_{Y3}, \quad (7)$$

где  $S_{Л.О.}$  – площадь поверхности листьев, тыс.  $m^2/га$ ;  $У_{Ф}$  – фактическая урожайность картофеля, т/га;  $T_{В.П.}$  – продолжительность вегетационного периода, сут;  $A_{S1}$ ,  $A_{S2}$ ,  $A_{S3}$ ,  $A_{Y1}$ ,  $A_{Y2}$ ,  $A_{Y3}$  – коэффициенты установленных эмпирических зависимостей.

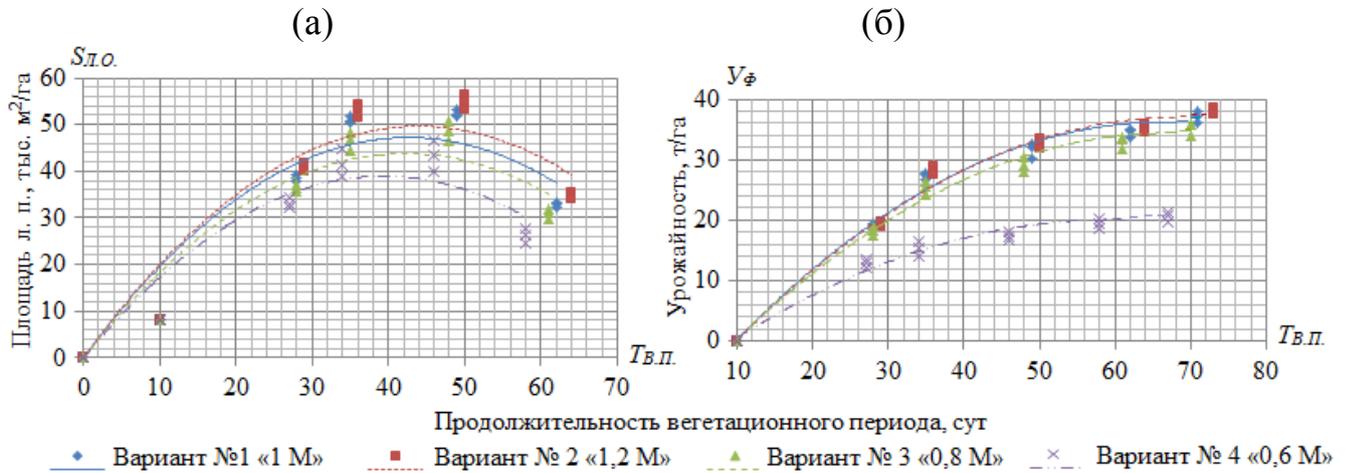


Рисунок 4 – Динамика прироста нарастания площади листовой поверхности картофеля (а) и массы клубней (б) за период вегетации при различных оросительных нормах, 2012–2014 гг.

Таблица 5 – Эмпирические коэффициенты зависимостей (6), (7)

Варианты опыта	Коэффициенты уравнений			Коэффициент аппроксимации $R^2$ , $S_{Л.О.}/У_{Ф}$
	$A_{S1}/A_{Y1}$	$A_{S2}/A_{Y2}$	$A_{S3}/A_{Y3}$	
«М»	0,026 / 0,011	2,214 / 1,495	0 / 13,47	0,90 / 0,98
«1,2 М»	0,026 / 0,011	2,259 / 1,474	0 / 12,42	0,91 / 0,98
«0,8 М»	0,025 / 0,010	2,073 / 1,395	0 / 12,51	0,91 / 0,98
«0,6 М»	0,025 / 0,008	1,978 / 0,939	0 / 8,012	0,90 / 0,97

Установлено, что понижение поливной нормы на 20 и 40 % от контрольного варианта уменьшает площадь поверхности листьев в среднем за годы исследований на 3,6 и 8,9 тыс.  $m^2/га$  (или на 6,9 и 17,0 %) соответственно. Повышение поливной нормы на 20 % от контрольного варианта увеличивает площадь листовой поверхности в среднем за годы исследований на 2,6 тыс.  $m^2/га$  (или на 5,0 %). Анализ данных показывает, что снижение поливной нормы на 20 и 40 % от контрольного варианта уменьшает прирост массы клубней картофеля в среднем за годы исследований на 1,9 и 16,6 т/га (или на 5,1 и 44,7 %) соответственно. Повышение поливной нормы на 20 % от контрольного варианта увеличивает прирост массы клубней картофеля в среднем за рассматриваемые годы исследований на 0,3 т/га (или на 0,8 %).

В результате проведённых исследований установлены фактические значения элементов уравнения водного баланса орошаемого поля (таблица 6), которые составили в среднем за годы исследований: оросительная норма ( $M$ ) изменялась в диапазоне от 252 до 126 мм; эвапотранспирация ( $ET$ ) от 306 до 398 мм; урожайность ( $У$ ) от 20,5 до 37,1 т/га. Структура водного баланса орошаемого поля карто-

феля составила: для «средневлажного» года по величине оросительной нормы 36,0 %, осадков – 46,0 %, влагозапасов в корнеобитаемом слое почвы – 18 % от общей величины эвапотранспирации; для «среднего» года, соответственно 53,0, 34,0 и 13,0 %; для «среднесухого» года – 70,0, 18,0 и 12,0 %.

Таблица 6 – Элементы уравнения водного баланса орошаемого поля картофеля, средние за годы исследований 2012–2014 гг.

Варианты опыта	Элементы уравнения водного баланса, мм					У т/га	K <sub>ET</sub> , мм/т	K <sub>M</sub> , мм/т
	W <sub>H</sub>	P	M	W <sub>K</sub>	ET			
1 «М»	215	117	210	167	375	37,1	10,1	5,7
2 «1,2 М»	215	117	252	186	398	37,4	10,6	6,7
3 «0,8 М»	215	117	168	153	345	35,2	9,8	4,8
4 «0,6 М»	215	117	126	142	306	20,5	15,0	6,1
Среднее	215	117	189	162	356	32,5	10,9	5,8
σ	–	–	49,04	17,18	35,97	7,32	2,16	0,73
V (%)	–	–	25,95	10,60	10,10	22,48	19,04	12,54
HCP <sub>05</sub>	–	–	31,98	11,21	23,46	3,79	1,11	0,38

**В четвёртой главе** «Основы управления орошением картофеля летнего срока посадки» изложены результаты исследований, обеспечивающие совершенствование модели управления орошением картофеля. В результате проведённых исследований получена зависимость (8) биоклиматических коэффициентов ( $K_{\omega}$ ) от величины влагозапасов ( $W_0$ ) в корнеобитаемом слое почвы для всех фаз роста и развития картофеля, выраженных в относительных величинах в среднем для лет характерных обеспеченностей по дефициту естественного увлажнения, описываемые полиномиальными зависимостями второй степени, с соответствующими эмпирическими коэффициентами по фазам развития (таблица 7):

$$K_{\omega} = \frac{ET}{E_{\omega}} = f\left(\frac{W_H + W_K}{2 \cdot W_{HB}}\right) = A_{K1} \cdot W_0^2 + A_{K2} \cdot W_0 + A_{K3}, \quad (8)$$

где  $K_{\omega}$  – биоклиматический коэффициент;  $ET$  – эвапотранспирация орошаемого поля, мм;  $E_{\omega}$  – потенциальная эвапотранспирация, мм;  $W_H$ ,  $W_K$ ,  $W_{HB}$  – влагозапасы в расчётном слое почвы, соответственно: начальные, конечные и при наименьшей влагоёмкости, мм;  $A_{K1}$ ,  $A_{K2}$ ,  $A_{K3}$  – коэффициенты установленных эмпирических зависимостей.

Получены также эмпирические зависимости для характерных лет различной водообеспеченности и в среднем за рассматриваемые годы исследований: эвапотранспирации ( $ET$ ) от фактической урожайности ( $V_{\phi}$ ) (рисунок 5); коэффициента водного баланса ( $K_M$ ) и фактической урожайности ( $V_{\phi}$ ) при различных оросительных нормах, выраженной в относительных координатах ( $M_0$ ):

Таблица 7 – Эмпирические коэффициенты зависимости (8)

Фазы роста и развития	Коэффициенты уравнений			Коэффициент аппроксимации $R^2$
	$A_{K1}$	$A_{K2}$	$A_{K3}$	
«Всходы»	0,114	1,747	0,025	0,98
«Бутонизация»	0,068	0,229	0,601	0,97
«Цветение»	0,082	0,605	0,672	0,99
«Прекращение роста ботвы»	0,073	0,550	1,395	0,97
«Увядание ботвы»	0,295	0,741	1,027	0,96
«Техническая спелость»	0,027	0,181	0,645	0,92

- эмпирические зависимости эвапотранспирации ( $ET$ ) от фактической урожайности ( $Y_\phi$ ) в среднем за рассматриваемые годы исследований:

$$ET = f(Y_\phi) = 94,393 \cdot Y_\phi^{0,376}, \quad R^2 = 0,79, \quad (9)$$

где  $ET$  – эвапотранспирация, мм;  $Y_\phi$  – фактическая урожайность, т/га.

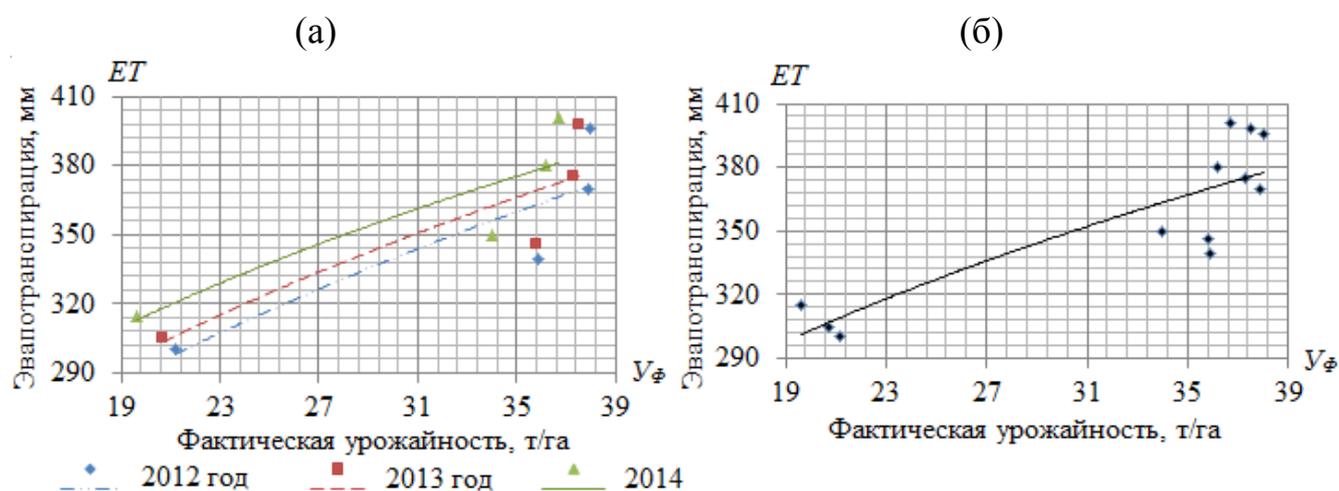


Рисунок 5 – Динамика эвапотранспирации от урожайности картофеля за 2012–2014 гг. (а) и в среднем (б)

- эмпирические зависимости урожайности ( $Y_\phi$ ) и их удельных значений ( $Y_0$ ) от изменения оросительных норм, выраженных в относительных координатах ( $M_0$ ) для лет характерных обеспеченностей:

$$Y_\phi = f(M_0) = -86,875 \cdot M_0^2 + 183,13 \cdot M_0 - 58,475; \quad R^2 = 0,96, \quad (10)$$

$$Y_0 = f(M_0) = -2,4312 \cdot M_0^2 + 2,0857 \cdot M_0 - 1,6091; \quad R^2 = 0,96, \quad (11)$$

где  $Y_\phi$  – фактическая урожайность картофеля, т/га;  $Y_0$  – показатель, определяемый по зависимости:  $Y_0 = Y_\phi / Y_{HB}$ ;  $M_0$  – показатель, определяемый по зависимости  $M_0 = M_\phi / M_{HB}$ ;

Установлены эмпирические зависимости среднесуточной эвапотранспирации по фазам роста и развития растений картофеля при различных оросительных нормах от суммы накопленных температур воздуха, а также динамики изменения эвапотранспирации на  $1^\circ\text{C}$  накопленной активной температуры воздуха за вегетационный период (рисунки 6, 7), описываемые полиномиальными зависимо-

стями второй степени, с соответствующими параметрами (таблица 8) и имеют вид:

$$ET_t = f(T_{B.П.}) = -A_{t1} \cdot T_{B.П.}^2 + A_{t2} \cdot 10^{-3} \cdot T_{B.П.}, \quad (12)$$

$$ET_{СУТ} = f(\sum t_A) = -A_{СУТ1} \cdot 10^{-6} \cdot \sum t_A^2 + A_{СУТ2} \cdot 10^{-3} \cdot \sum t_A, \quad (13)$$

где  $ET_{СУТ}$  – среднесуточная эвапотранспирация, мм;  $\sum t_A$  – сумма накопленных активных температур воздуха, °С.  $A_{t1}, A_{t2}, A_{t3}, A_{СУТ1}, A_{СУТ2}, A_{СУТ3}$  – коэффициенты установленных эмпирических зависимостей.

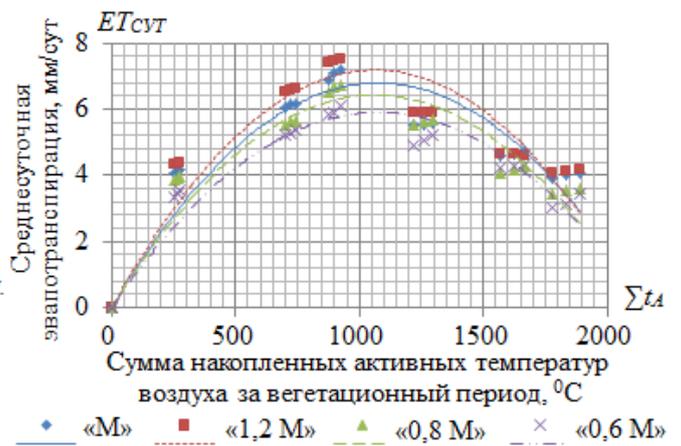
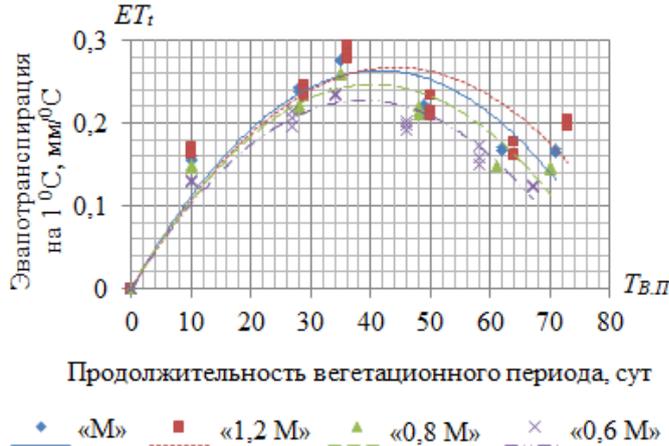


Рисунок 6 – Динамика эвапотранспирации на 1 °С от накопленной активной температуры воздуха при различных оросительных нормах

Рисунок 7 – Динамика среднесуточной эвапотранспирации за вегетационный период при различных оросительных нормах

Таблица 8 – Эмпирические коэффициенты зависимостей (12), (13)

Варианты опыта	Коэффициенты уравнений		Коэффициент аппроксимации $R^2$ , $ET_t/ET_{СУТ}$
	$A_{t1}/A_{СУТ1}$	$A_{t2}/A_{СУТ2}$	
«М»	$2 \cdot 10^{-4} / 6 \cdot 10^{-6}$	$12,7 \cdot 10^{-3} / 12,6 \cdot 10^{-3}$	
«1,2 М»	$1 \cdot 10^{-4} / 6 \cdot 10^{-6}$	$12,1 \cdot 10^{-3} / 13,5 \cdot 10^{-3}$	0,80 / 0,98
«0,8 М»	$2 \cdot 10^{-4} / 6 \cdot 10^{-6}$	$12,2 \cdot 10^{-3} / 12,08 \cdot 10^{-3}$	0,89 / 0,98
«0,6 М»	$2 \cdot 10^{-4} / 5 \cdot 10^{-6}$	$12,0 \cdot 10^{-3} / 10,98 \cdot 10^{-3}$	0,93 / 0,97

Установлены отклонения потенциальной эвапотранспирации и эвапотранспирации от их среднемноголетних значений по данным соответствующих метеостанций и экспериментальных данных, вычислены соответствующие модульные коэффициенты:

$$K_{\Delta E} = \frac{E_{\omega}}{E_o}, K_{\Delta ET} = \frac{ET}{\overline{ET}}, \quad (14)$$

где  $K_{\Delta E}$  и  $K_{\Delta ET}$  – модульные коэффициенты значений потенциальной эвапотранспирации и эвапотранспирации;  $ET$  и  $E_{\omega}$  – фактические значения эвапотранспирации и потенциальной эвапотранспирации, мм;  $\overline{ET}$ ,  $\overline{E_{\omega}}$  – среднемноголетние значения потенциальной эвапотранспирации и эвапотранспирации, мм.

На этом основании получена квадратичная зависимость относительных отклонений эвапотранспирации от потенциальной эвапотранспирации, которая описывается уравнением полиномиального вида второй степени:

$$K_{\Delta ET} = f(K_{\Delta E}) = 1,51 \cdot \left(\frac{E_{\omega}}{E_{\omega}}\right)^2 - 1,48 \cdot \left(\frac{E_{\omega}}{E_{\omega}}\right) + 0,9, R^2 = 0,96 \quad (16)$$

Предложен алгоритм оперативного управления орошением пойменных земель Нижнего Дона (рисунок 8).

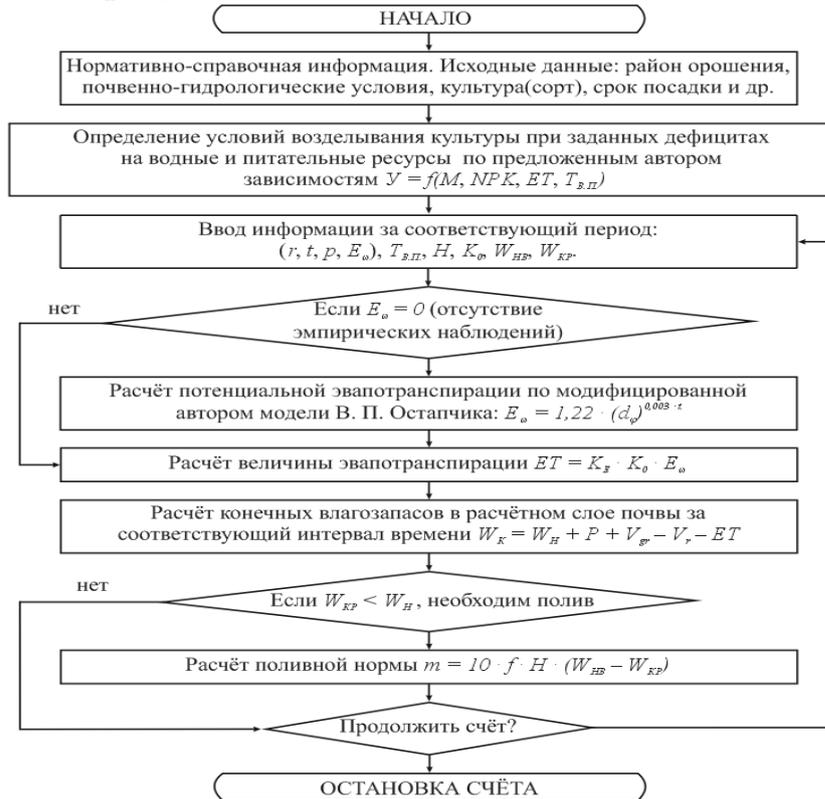


Рисунок 8 –Алгоритм оперативного управления орошением

В результате проведённых исследований модифицирована модель В. П. Остапчика для определения потенциальной эвапотранспирации в условиях поймы Нижнего Дона:

$$E_{\omega} = A \cdot (d_{\varphi})^{b \cdot t}, \quad (15)$$

где  $d_{\varphi}$  – дефицит влажности воздуха, мб;  $t$  – температура воздуха, °С;  $A$ ,  $b$  – эмпирические параметры:  $A = 1,22$ ;  $b = 0,003$ ;  $R^2 = 0,84$ .

На основании проведённых исследований разработана программа для ЭВМ: «Программа по определению параметров функционирования оросительной системы» (рисунок 9).

В пятой главе «Энерго-экономическая эффективность дифференцированных режимов орошения картофеля летнего срока посадки» проведён биоэнергетический и экономический расчёт предлагаемых элементов технологии возделывания картофеля. Наиболее экономически и энергетически выгодным является вариант при снижении на 20 % от расчётной величины поливных норм. При этом

рентабельность возделывания картофеля летнего срока посадки составила 185,95%; коэффициент энергетической эффективности всей массы – 3,07; удельные затраты совокупной энергии составили 103,49 ГДж/га.

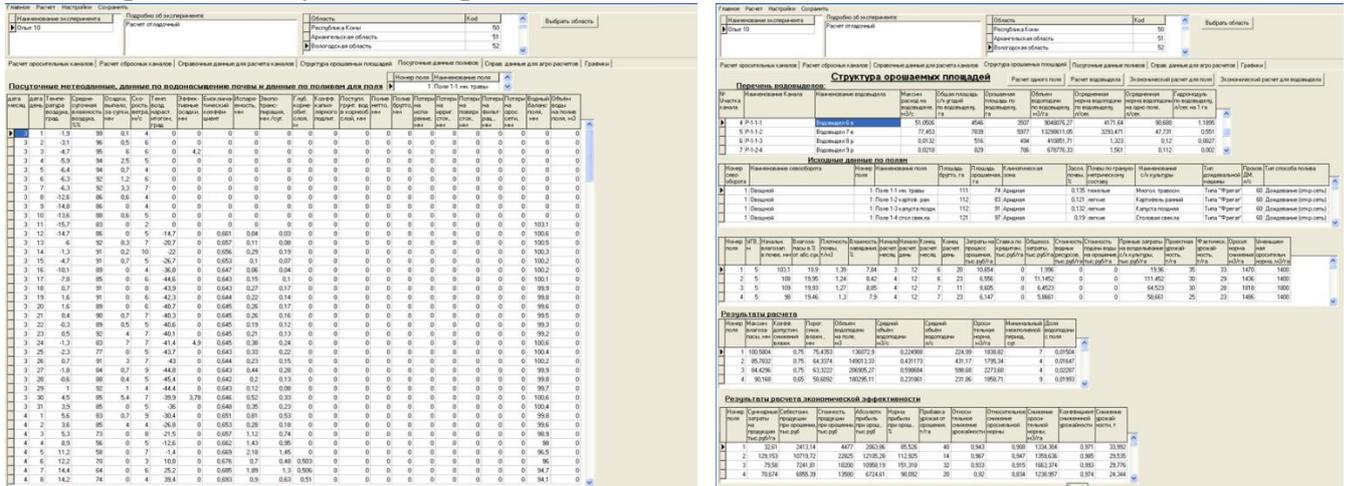


Рисунок 9 – Элементы предлагаемой программы оперативного управления орошением

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ существующих методов управления орошением сельскохозяйственных культур позволил обосновать приоритетные направления их совершенствования, для разработки и реализации которых предложена функциональная структура комплекса задач управления орошением на основе разработки информационной базы данных объекта исследований, алгоритма и компьютерной программы управления.

2. Разработана информационная база данных по управлению водопотреблением и режимом орошения картофеля, включающая нормативно-справочную, сезонную и оперативную информацию объекта исследований, отличающуюся от существующих информационных баз комплексом полученных математических зависимостей по управлению процессом орошения как для условий нормативной влагообеспеченности, так и заданных уровней дефицитов на водные и питательные режимы.

3. Изучены структура и элементы водного баланса орошаемого поля с определением численных значений величин атмосферных осадков, оросительных норм, влагозапасов в расчётном слое почвы, эвапотранспирации и урожайности картофеля для лет различной обеспеченности по дефициту естественного увлажнения, что позволило разработать рациональный режим орошения.

4. Получены эмпирические зависимости для лет различной обеспеченности и в среднем за годы проведения исследований: эвапотранспирации картофеля от урожайности, которые описываются в общем виде уравнением степенного вида с коэффициентом достоверности аппроксимации равным, 0,80; коэффициента водного баланса, урожайности и прироста урожайности от изменения оросительных норм; динамики изменения биоклиматических коэффициентов от влагозапасов в расчётном слое почвы и от суммы накопленных активных температур воздуха за период вегетации; динамики изменения величин среднесуточной эвапотранспирации как от сумм накопленных активных температур воздуха за вегетационный период, так и расчёте на  $1^{\circ}\text{C}$ , которые описываются в общем виде уравнениями полиномиального вида с установленными соответствующими эмпирическими коэффициентами и значениями коэффициентов аппроксимации от 0,86 до 0,98.

5. Разработаны алгоритм и компьютерная программа, обеспечивающие реализацию полученной модели управления орошением.

6. Разработана модель определения эвапотранспирации и управления орошением картофеля с учётом повышения качества информационной базы данных, влияния фактической изменчивости гидрометеорологических условий, влажности почвы и уровня урожайности, что обеспечивает экономию водных и энергетических ресурсов на 20 %, повышение точности определения эвапотранспирации на 25 %.

Величина эвапотранспирации определяется на основе взаимосвязи с потенциальной эвапотранспирацией, значение которой устанавливается по региональной эмпирической зависимости В. П. Остапчика, модифицированной автором.

7. Предложенная модель управления орошением картофеля обеспечивает экономию водных ресурсов от 12,4 до 15,9 %; количество сэкономленного топлива, необходимого для подачи воды на орошаемое поле, от 6,9 до 7,5 %. Общий экономический эффект составляет 30,188 тыс. руб. в расчёте на 1 га орошаемой площади. Коэффициент эффективности массы картофеля – 3,07; удельные затраты совокупной энергии составили 103,49 ГДж/га.

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ**

1. В хозяйствах любой формы собственности, имеющих орошаемые земли, применять разработанную модель управления орошением картофеля при составлении внутривозрастных планов водопользования.

2. Использовать разработанную модель управления орошением при проектировании новых и реконструкции имеющихся внутривозрастных оросительных систем.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Продолжение работы по данной тематике предполагает адаптацию модели управления орошением для других сельскохозяйственных культур в условиях поймы Нижнего Дона.

### Список опубликованных работ

#### В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Ольгаренко В. Иг. Возделывание картофеля летней посадки в условиях орошения на пойменных землях Юга России [Электронный ресурс] / В. Иг. Ольгаренко // Научный журнал КубГАУ: политематический сетевой электрон. журн. / Кубанский гос. аграрн. ун-т. – Электрон. журн. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – № 107(03). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/03/pdf/13.pdf>.

2. Бабичев А. Н. Влияние дифференциации поливной нормы на рост и развитие картофеля летнего срока посадки в условиях поймы Нижнего Дона [Электронный ресурс] / А. Н. Бабичев, **В. Иг. Ольгаренко** // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – № 3(19). – Режим доступа: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec357-field6.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec357-field6.pdf)

3. Бабичев А. Н. Технологические подходы к нормированию орошения и аппарат прогнозирования водопотребления картофеля в условиях поймы Нижнего Дона [Электронный ресурс] / А. Н. Бабичев, **В. Иг. Ольгаренко** // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – № 2(22). – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=406&id=416>

#### В сборниках научных конференций и симпозиумов

4. Ольгаренко, В. Иг. Информационные технологии планирования водопользования / В. Иг. Ольгаренко // Актуальные вопросы мелиораций земель: сб. статей аспирантов, магистрантов, студентов / Новочерк. гос. мелиор. акад. – Вып. 1 – Новочеркасск, 2011. – С. 107–111

5. Ольгаренко, В. Иг. Об основных направлениях совершенствования эксплуатации мелиоративных систем / В. Иг. Ольгаренко // Актуальные вопросы мелиораций земель: сб. статей аспирантов, магистрантов, студентов / Новочерк. гос. мелиор. акад. – Вып. 2. – Новочеркасск, 2012. – С. 95–100

6. Ольгаренко, В. Иг. Об основных принципах разработки конструктивных решений экологически сбалансированных мелиоративных систем / В. Иг. Ольгаренко // Актуальные вопросы мелиораций земель: сб. статей аспирантов, магистрантов, студентов / Новочерк. гос. мелиор. акад. – Вып. 2. – Новочеркасск, 2012. – С. 20–27.

7. Ольгаренко, В. Иг. Перспективные сорта картофеля для летнего срока посадки / В. Иг. Ольгаренко // Наука, образование, общество: современные вызовы и

перспективы: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. 28 июня 2013 г. – В 4 ч. – Ч. IV; М-во образования и науки. – М.: 2013. – С. 51–52.

8. Ольгаренко, В. Иг. Режимы орошения картофеля летнего срока посадки / В. Иг. Ольгаренко // Научные и технологические подходы в развитии аграрной науки: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных 13–15 мая 2014 г. – М., 2014. – С. 189–192.

9. Ольгаренко, В. Иг. Дифференцированные режимы орошения и минерального питания картофеля летнего срока посадки / В. Иг. Ольгаренко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. / ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вып. 52. – Новочеркасск, 2014. – С. 160–164.

10. Ольгаренко, В. Иг. Продуктивность картофеля летнего срока посадки в условиях орошения поймы Нижнего Дона / В. Иг. Ольгаренко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. / ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вып. 56. – Ч. 2. – Новочеркасск, 2014. – С. 22–26.

11. Ольгаренко, В. Иг. Дифференцированные режимы орошения картофеля летнего срока посадки на юге Российской Федерации / В. Иг. Ольгаренко // Современное состояние и перспективы инновационного развития овощеводства: материалы Междунар. Науч.-практ. конф. 8-11 июля 2014г. – п. Самохваловичи Минского района, Республика Беларусь, 2014. – С. 112–115.

12. Ольгаренко В. Иг. Продуктивность картофеля летнего срока посадки при дифференциации режимов орошения и минерального питания на юге России / В. Иг. Ольгаренко // Комплексные мелиорации – средство повышения продуктивности сельскохозяйственных земель: материалы юбилейной междунар. науч.-практ. конф. 26-27 ноября 2014 г. – М., 2014. – С. 127–131.

13. Ольгаренко, В. Иг. Исследования режимов орошения и удобрения картофеля летнего срока посадки / В. Иг. Ольгаренко // Мелиорация, водоснабжение и геодезия: материалы межвузовской научно-практической конференции /колл. авторов; под ред. проф. А. Ю. Черемисинова. – Воронеж, 2014. – С. 52–56.

14. Ольгаренко, В. Иг. Орошение картофеля летнего срока посадки на Юге России / В. Иг. Ольгаренко // Актуальные вопросы ведения земледелия в условиях изменения климата: сборник материалов междунар. научн.-практ. конф. молодых учёных 25 апреля 2015 г. – Херсон, 2015. – С. 130–133.

15. Ольгаренко, В. Иг. Возделывание картофеля летнего срока посадки / В. Иг. Ольгаренко // Наука и молодёжь: новые идеи и решения: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, посвящённой 70-летию Победы в Великой Отечественной войне, г. Волгоград 1-3 апреля 2015 г. Часть I. – Волгоград, 2015. – С. 335–338.