

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»

На правах рукописи

Медведев Николай Викторович

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРОШАЕМЫМ ПОЛЕМ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ УСЛОВИЙ
СУХОСТЕПНОГО ЗАВОЛЖЬЯ**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор с.-х. наук, доцент
Корсак Виктор Владиславович

Саратов – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПРЕЦИЗИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ И СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПОЛИВНЫХ УГОДИЙ.....	11
1.1 Особенности условий и обоснование внедрения цифровых технологий и прецизионных методов земледелия на орошаемых землях.....	11
1.2 Применение прецизионных методов в орошаемом земледелии.....	18
1.3 Создание цифровых карт орошаемых земель.....	31
1.4 Цифровые двойники и их использование в сельском хозяйстве.....	36
Выводы по первой главе.....	40
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОРОШАЕМОГО ПОЛЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ САРАТОВСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ.....	42
2.1 Концепция цифрового двойника орошаемого поля.....	42
2.2 Разработка цифровой карты и атрибутивной базы данных цифрового двойника орошаемого поля.....	48
2.3 Определение структуры и состава цифрового двойника орошаемого поля	55
2.4 Программа оценки пространственного распределения состояния потенциального и эффективного плодородия почв орошаемого поля.....	64
2.5 Программа расчета пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля.....	71
Выводы по второй главе.....	74
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА, УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	76
3.1 Программа полевых и лабораторных исследований.....	76
3.2 Климатические условия места проведения исследований.....	76
3.3 Погодные условия поливного сезона места проведения исследований.....	81
3.4 Характеристика почв места проведения исследований.....	84

3.5	Методики проведения лабораторных и полевых исследований	86
	Выводы по третьей главе.....	89
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, АЛГОРИТМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОРОШАЕМОГО ПОЛЯ		
		91
4.1	Результаты полевых и лабораторных исследований почв опытного участка	91
4.2	Цифровая карта цифрового двойника орошаемого поля	97
4.3	Атрибутивная база данных цифрового двойника орошаемого поля	100
4.4	Алгоритмы функционирования компьютерных программ цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья.....	108
	Выводы по четвертой главе.....	114
ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ПРИМЕРЕ ОРОШАЕМОГО ПОЛЯ УНПО «ПОВОЛЖЬЕ» ВАВИЛОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.....		
		115
5.1	Методический подход к оценке эффективности	115
5.2	Затраты на внедрение системы цифрового двойника	116
5.3	Расчет экономической эффективности за счет снижения расхода водных ресурсов при проведении поливов	118
5.4	Экономический эффект и сроки окупаемости внедрения технологии	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		122
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....		124
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ		125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		126
ПРИЛОЖЕНИЯ.....		154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время развитие сельского хозяйства и мелиорации в России происходит в сложных экономических, экологических и социальных условиях. Однако обеспечение продовольственной безопасности страны невозможно без мелиорации земель и развития орошаемого земледелия, так как значительная часть сельскохозяйственных угодий находится в засушливых районах, относящихся к зонам неустойчивого земледелия.

Поволжье является крупнейшей зоной земледелия России, где на балансе числится 907,811 тыс. га орошаемых земель, в сельскохозяйственном производстве фактически используется 776,11 тыс. га. Саратовская область по своим почвенно-климатическим условиям относится к числу регионов, где важнейшим стабилизирующим фактором сельскохозяйственного производства является орошение. При соблюдении научно обоснованных систем земледелия и технологий орошения здесь возможно обеспечение высокой продуктивности сельскохозяйственных угодий, в 2 - 3 раза превышающих выход растениеводческой продукции богарных земель.

Саратовская область является одним из крупнейших регионов орошаемого земледелия в РФ, где площадь поливных массивов равняется 257,33 тыс. га, полив осуществляется на 115 тыс. га, а основная часть орошаемых территорий (более 70%), находится в зоне аридного климата - Саратовском Заволжье. Орошение является ключевым подходом к ведению рационального и эффективного сельскохозяйственного производства в засушливых районах. При этом, длительное орошение без учета пестроты почвенного плодородия, ведет к ухудшению агрофизической деградации почв, ухудшению водно-физических свойств и снижения содержания гумуса.

Развитие точного земледелия и цифровизации АПК является одним из ключевых направлений государственной политики России. По данным Минсельхоза РФ цифровая трансформация сельского хозяйства посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений для обеспечения

технологического прорыва в АПК приведет к росту производительности в 2 раза, снижению себестоимости сельскохозяйственной продукции на 20 %, что позволит обеспечить продовольственную безопасность страны.

Одним из главных направлений развития растениеводства, в том числе на мелиорированных землях, в последние годы является внедрение в него методов прецизионного или точного земледелия, которое позволяет учитывать почвенную пространственную неоднородность условий произрастания поливных культур. Такие методы регулирования как водного, так и пищевого режимов зональных почв орошаемых массивов очень актуальны для мелиоративных систем Среднего и Нижнего Поволжья, особенно Саратовской области, так как регулярное орошение земель, удаленных от основных водоисточников – реки Волги, Саратовского и Волгоградского водохранилищ экономическим нецелесообразно, а прибрежные территории отличаются высокой пестротой почвенного плодородия, химических и водно-физических свойств почв.

Цифровой двойник является наиболее эффективным и современным средством интеграции всей информации о пространственном распределении геоморфологических, агрофизических и агрохимических, мелиоративных и гидрогеологических, агротехнических и вегетационных показателей орошаемых полей, применение которого позволит учитывать пространственную неоднородность этих показателей при назначении агротехнических мероприятий.

Степень разработанности темы. Разработкой и внедрением цифровых технологий в мелиорации в целом и в орошаемое земледелие в частности, занимались ученые мелиоративной отрасли из разных регионов России и зарубежных стран: Дубенок Н. Н. (2022-2025), Щедрин В. Н., Васильев С. М. (2016, 2019-2020), Якушев В. П. (2002, 2007, 2016-2017, 2019), Ольгаренко В. И. (2012, 2018), Ольгаренко Г. В. (2025), Юрченко И. Ф. (2004, 2020-2022), Рожков В.А. (1989, 2002, 2010), Абдразаков Ф. К. (2018-2019), Рогачев А. Ф. (2025),

Гришаева О. Ю. (2022), Рунов Б. А. (2012), Klerkx L., (2019), Saiz-Rubio V., (2020).

Развитием и внедрением прецизионных методов земледелия на орошаемых землях, занимались: Бородычев В. В. (2015, 2016), Дубенок Н.Н. (2022-2023, 2025), Бабичев А. Н. (2017, 2019), Шадский В. А. (2007, 2020-2022), Пронько Н. А. (2001, 2008-2012), Корсак В. В. (2009, 2014, 2021-2025), Кравчук А. В. (2007), Фалькович А. С. (2009-2011, 2016-2017), Камышева Г. Н. (2012, 2022), Соловьев Д. А. (2021), Кирейчева Л. В. (2021-202), Рогачев Д. А. (2025), Зейлигер А. М. (2010, 2021, 2023), Сычев В. Г. (2019-2020), Афанасьев Р. А. (2008, 2019-2020), Шевченко В. А. (2025), Монастырский В. А. (2019), Зверьков М. С. (2024-2026), Журавлева, Л. А. (2025), Волкова Е. А. (2025), Ганченко В. В. (2017), Михайленко И. М. (2016, 2018), Мячин М. А. (2025), McBratney A., (2005), Zhang N., (2002), Xing Y. (2025).

Исследованиями в области создания цифровых двойников для сельского хозяйства занимались ученые отечественных и зарубежных научных школ: Эшпулатов Д. Б. (2023), Дорохов А. С. (2023), Сосфенов Д. А. (2023), Сафонова Т. В. (2023), Kritzing W. (2018), Jones D. (2020), Fuller A. (2020), Lu Y. (2020), Pylaniadis C. (2021), Papageorgas P. (2023), Di Maggio A. (2025), Subeesh A. (2025).

Основываясь на результатах исследований, приведенных в вышеизложенном списке литературы, можно сделать вывод о том, что исследования по разработке цифровых технологий в мелиорацию, внедрению прецизионных методов земледелия на орошаемые территории проводились большим количеством ученых в разных регионах страны и за рубежом, однако не имели комплексного подхода, который объединяет методы сбора и хранения данных, моделирование процессов, и поддержку принятия решений для условий сухостепного Заволжья. Данное заключение, послужило причиной для выбора тематики и направления исследований.

Цель исследования. Повышение эффективности использования орошаемых земель Саратовского Заволжья за счет внедрения методов точного земледелия на основе разработки цифрового двойника орошаемого поля.

Задачи исследования. В процессе исследований были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Провести анализ научных исследований и практических разработок в области применения методов прецизионного земледелия на орошаемых землях и создания цифровых двойников поливных угодий;
- 2) Предложить теоретическое обоснование разработки концепции цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья;
- 3) Создать цифровую карту и атрибутивную базу данных и знаний цифрового двойника орошаемого поля на примере орошаемых земель УНПО «Поволжье» Вавиловского университета;
- 4) Разработать алгоритмы и компьютерные программы использования информации цифрового двойника при эксплуатации поливных земель на примере орошаемых земель УНПО «Поволжье» Вавиловского университета в Энгельсском районе Саратовской области;
- 5) Оценить экономическую эффективность разработки и внедрения цифрового двойника орошаемого поля УНПО «Поволжье» Вавиловского университета.

Научная новизна. Разработана концепция создания цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья. Определены принципы создания и ведения системы управления орошаемым полем на основе использования его цифрового двойника.

Впервые для условий поливного земледелия Саратовского Заволжья определены состав и структура информационного обеспечения цифрового двойника орошаемого поля, в том числе состав его цифровой карты и атрибутивной базы данных.

Разработаны, апробированы и внедрены в УНПО «Поволжье» Вавиловского университета алгоритмы и компьютерные программы

использования информации цифрового двойника в технологическом процессе выращивания поливных культур.

Установлена экономическая эффективность внедрения технологий цифрового двойника орошаемого поля при проведении агротехнических мероприятий.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в разработке концепции системы управления орошаемым полем на основе создания его цифрового двойника, в развитии научно-методических основ разработки интеллектуальных систем управления мелиорируемыми территориями, за счет определения состава, структуры цифровой карты, атрибутивной базы данных и знаний, алгоритмов работы программ использования информации цифрового двойника орошаемого поля. Основные разработки, результаты, выводы и рекомендации исследования внедрены в учебный процесс при изучении дисциплин в рамках реализации направления подготовки «Гидромелиорация».

Результаты исследований внедрены в УНПО «Поволжье» Энгельсского района Саратовской области путем применения компьютерных программ цифрового двойника орошаемого поля на опытном участке 60 га при расчете поливных норм, что позволило сократить расход оросительной воды на 20%, с экономическим эффектом 7,0 тысяч рублей с 1 гектара и в ОПХ «ВолжНИИГиМ» Энгельсского района Саратовской области, где применение технологий цифрового двойника орошаемого поля позволило выделить зоны для дифференцированного внесения удобрений и поливных норм, что позволило сократить расход поливной воды на 20%.

Методология и методы исследования. Исследование основывается на анализе трудов отечественных и зарубежных ученых в области орошаемого земледелия и внедрении в него цифровых технологий. Теоретические методы, используемые в работе: системный анализ, статистический метод. В качестве методологической основы исследований принят метод полевого эксперимента, математическое моделирование, геоинформационные технологии,

дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы. Разработка программы исследований и закладка полевого опыта осуществлялась в соответствии с требованиями общепринятых методик.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Концепция цифрового двойника орошаемого поля.
- 2) Цифровая карта цифрового двойника орошаемого поля.
- 3) Атрибутивная база данных цифрового двойника орошаемого поля.
- 4) Алгоритмы и компьютерные программы использования информации цифрового двойника при эксплуатации поливных земель на примере орошаемого поля УНПО «Поволжье» Вавиловского университета в Энгельсском районе Саратовской области.
- 5) Экономическая эффективность внедрения цифрового двойника орошаемого поля в УНПО «Поволжье».

Степень достоверности и апробация результатов. Подтверждается многолетним периодом проведения исследований с использованием методик закладки и проведения полевых и лабораторных опытов, с применением современного оборудования, статистической обработкой полученных экспериментальных данных.

Основные результаты исследований были доложены на международных научно-практических конференциях: «Основы рационального природопользования» (Саратов 2022-2025 гг.), «Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» (Саратов 2022-2026 гг.), «Глобальные вызовы и инновационные решения в мелиоративном комплексе» посвященной 60-летию образования Волжского НИИ Гидротехники и Мелиорации (Энгельс 2026 г.), ежегодных конференциях профессорско-преподавательского состава кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» (Саратов 2023-2026 гг.).

Публикации. По материалам диссертационных исследований было опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 статьи – в журналах, входящих в

список изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов докторских и кандидатских диссертаций. Общий объем с учетом долевого участия в коллективных публикациях составляет 5,3 печ.л., из них 2,5 печ.л. принадлежит автору.

ГЛАВА 1 ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПРЕЦИЗИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ И СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПОЛИВНЫХ УГОДИЙ

Современные информационно-цифровые технологии играют ключевую роль в развитии сельского хозяйства, особенно в области орошаемого земледелия. Одним из перспективных направлений является внедрение цифровых двойников орошаемых полей — виртуальных моделей реальных объектов, позволяющих анализировать состояние сельскохозяйственных угодий, следить за основными показателями и оптимизировать процессы управления ими.

Разработка цифровых двойников сельскохозяйственных объектов и, прежде всего, поливных угодий и отдельных орошаемых полей в настоящее время, учитывая бурно развивающиеся технические средства точного земледелия, в том числе предназначенные для дозированного внесения минеральных удобрений и оросительной воды, дифференцированных в зависимости от обеспеченности конкретных участков поле влагой и питательными элементами, является очень перспективным направлением развития аграрной науки в целом, и ее мелиоративной отрасли в частности.

Обзор текущего научно-технического уровня развития прецизионного орошения проведен с целью дальнейшего совершенствования рассматриваемой отрасли сельского хозяйства, рационализации водопользования, минимизации ресурсозатрат для получения единицы урожая вместе с обеспечением стабильной и высокой продуктивности растениеводства, устойчивой и контролируемой экологической обстановки на мелиорируемых землях.

1.1 Особенности условий и обоснование внедрения цифровых технологий и прецизионных методов земледелия на орошаемых землях

Поволжье является одним из крупнейших регионов России по возделыванию сельскохозяйственных культур, где основные агроландшафты

сосредоточены в зоне рискованного земледелия, в сложных природно-климатических условиях. Мелиорируемые земли Поволжья характеризуются дефицитом водных ресурсов, резкими климатическими изменениями и высокой изменчивостью атмосферных осадков. Основные территории сельскохозяйственного назначения сосредоточены в наиболее засушливом районе области – Заволжье. Общая площадь орошаемых земель в области составляет 257,3 тыс. га, при этом большая их часть (более 70%) сосредоточена именно в Заволжье. (Пронько Н.А., 2005, Шадских В.А. и др., 2020, 2022, Колганов А.В. и др., 2026)

Саратовское Заволжье характеризуется сложным геологическим и геоморфологическим строением, что предопределяет высокую вариабельность почвенного покрова. Территории Саратовского Заволжья характеризуются преобладанием почв сухостепной зоны. Почвенный покров агроландшафтов Саратовского Заволжья представлен преимущественно каштановыми почвами различных подтипов, а также лугово-каштановыми почвами и комплексами с солонцами. (Абдразаков Ф.К., 2019, Гришин П.Н. и др., 2023)

Основная часть мелиорируемых земель Саратовского Заволжья расположена в зоне темно-каштановых почв, эти почвы являются преобладающими на орошаемых массивах.

Длительное орошение без применения комплекса мелиоративных мероприятий на темно-каштановых почвах ведет к изменению физических свойств этих почв, приводя к их агрофизической деградации. (Пронько Н.А., 2009)

Гранулометрический состав является одной из важнейших характеристик почв, определяющей их водно-физические свойства, фильтрационную способность, устойчивость к деградационным процессам и пригодность к орошению. Гидрологические свойства темно-каштановых почв существенно варьируют в зависимости от их положения в рельефе и гранулометрического состава.

Мелиорируемые земли Саратовского Заволжья обладают высокой пестротой почвенного плодородия, учет которой необходим при планировании агротехнических мероприятий, для рационального использования водных ресурсов в условиях их дефицита и для внесения оптимальных доз минеральных удобрений. (Тарбаев В.А., 2025)

Анализ показателей потенциального плодородия почв орошаемых земель Саратовского Заволжья, показывает большую вариативность содержания гумуса в пахотном горизонте, многие мелиорируемые земли имеют показатели содержания гумуса ниже минимальных значений зональных почв. (таблица 1.1) Длительное орошение темно-каштановых почв приводит к существенной трансформации содержания органического вещества. (Пронько Н.А. и др., 2005, 2009, Янюк, В. М., 2021, Шадских В.А. и др., 2023)

Таблица 1.1 - Динамика содержания гумуса в орошаемых темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья

Период наблюдений	Содержание гумуса, %	Диапазон варьирования, %	Коэффициент вариации, %
До начала орошения (1960-1970 гг.)	3,8-4,2	3,5-4,8	12-15
25-30 лет орошения (1990-е гг.)	3,0-3,4	2,4-3,9	22-26
40-50 лет орошения (2000-2010-е гг.)	2,7-3,2	2,0-3,5	25-30
Текущий период (2010-2026 гг.)	1,8-2,7	1,3-3,2	30-35

Пространственная вариабельность свойств, обуславливающих эффективное плодородие, является одной из фундаментальных характеристик почвенного покрова земель агроландшафтов Саратовского Заволжья. (таблица 1.2) Высокая пространственная вариативность показателей эффективного плодородия (рисунок 1.1.) почв Саратовского Заволжья, обусловленная как природными факторами (комплексность почвенного покрова, рельеф), так и длительным орошением без учета неоднородности условий произрастания

сельскохозяйственных культур. (Ескова Левина, В. С., 2008, Пронько В.В. и др., 2010)

Таблица 1.2 - Пространственная неоднородность содержания элементов питания в пахотном слое орошаемых почв

Элемент питания	Среднее содержание, мг/кг	Диапазон варьирования мг/кг	Коэффициент вариации, %	Основная причина пестроты
Нитратный азот (N-NO ₃)	10-15	3-35	35-45	Неравномерность промывного режима, пятнистость денитрификации
Аммонийный азот (N-NH ₄)	8-12	4-18	20-25	Сорбционные свойства почвы
Подвижный фосфор (P ₂ O ₅)	20-25	8-50	30-40	Неравномерное внесение удобрений, сорбция
Обменный калий (K ₂ O)	250-300	150-400	15-20	Гранулометрический состав, вынос урожаем



Рисунок 1.1- Картограмма распределения содержания обменного калия мг/100 г почвы, в ОПХ ВолжНИИГиМ

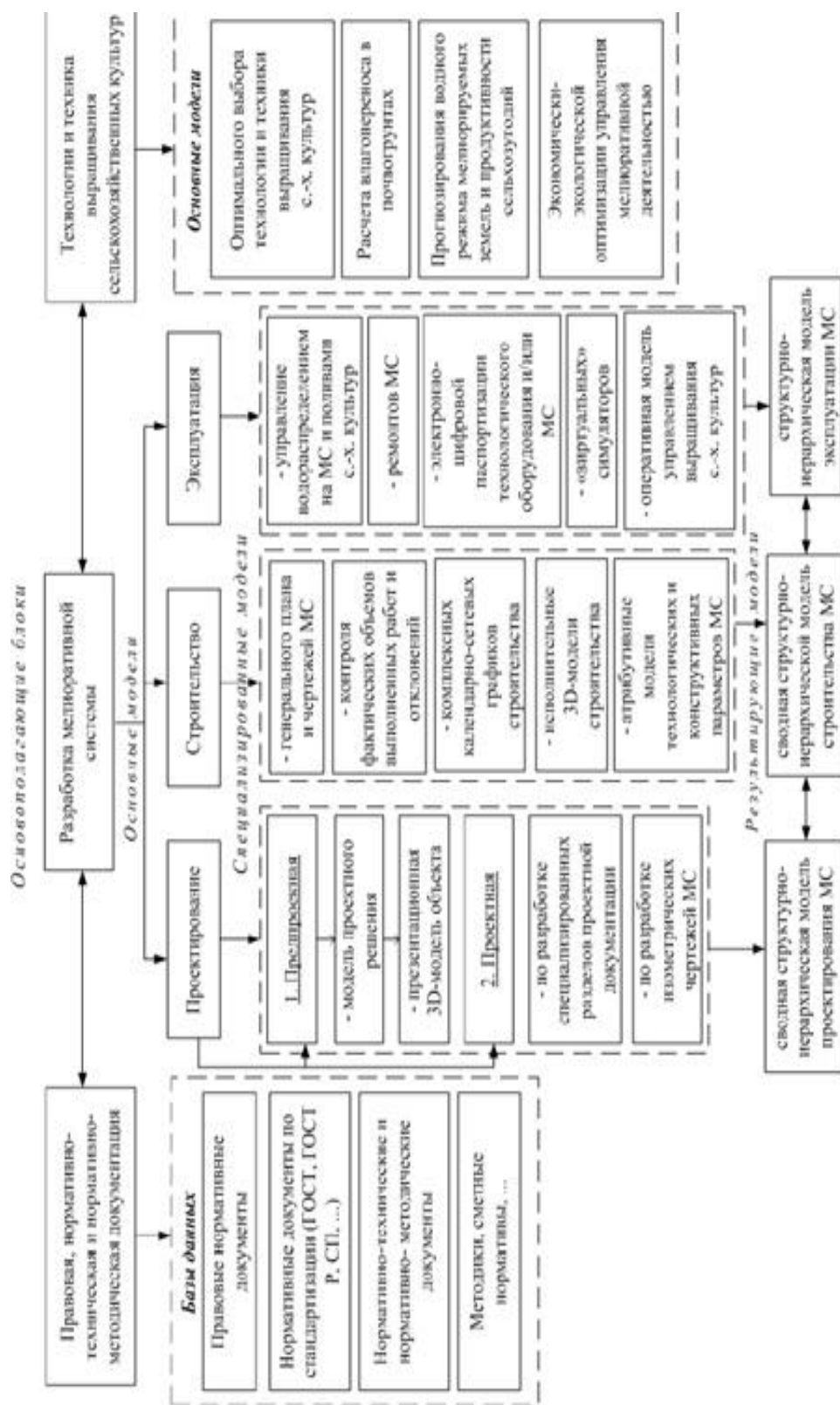
Фундаментальная особенность мелиорируемых земель Саратовского Заволжья – природная неоднородность почвенного покрова, вызванная геоморфологическим строением, литологией, историей формирования ландшафтов, к которой добавляется высокая вариабельность водно-физических свойств почв. Для орошаемых земель Саратовского Заволжья характерна многофакторная пространственная пестрота почвенного плодородия, которая является главным препятствием для эффективного применения традиционных методов и ключевым аргументом в пользу внедрения цифровых технологий и прецизионных методов земледелия, для рационального и ресурсоэффективного сельскохозяйственного производства. (Овчинников А. С. и др., 2018, Кижаяева В.Е., 2022)

Современный этап развития агропромышленного комплекса характеризуется переходом от традиционных методов управления мелиорируемыми землями к цифровым технологиям, которые позволяют собирать, обрабатывать и анализировать большие объемы данных о состоянии почвенного покрова, распределении ресурсов, состоянии возделываемых культур, для оптимальной оценки и принятии обоснованных решений. Особое значение данный переход имеет в области орошаемого земледелия, где в условиях изменения климата и необходимости рационального потребления водных ресурсов возникает потребность в формировании новых инструментов управления мелиорируемыми территориями на основе разработки цифровых технологий. (Абдразаков Ф.К., 2018, Юрченко И.Ф., 2021-2022, Дубенок, Н.Н. и др., 2025, Klerkx L., 2019)

В основе процесса цифровизации мелиоративной отрасли должен лежать комплексный подход, объединяющий внедрение информационных систем, автоматизированные системы контроля, программные комплексы, инструменты мониторинга, обработки и хранения данных, позволяющий достичь повышения эффективности эксплуатации агроландшафтов. Переход к цифровым технологиям в агропромышленном комплексе рассматривается как единая система управления сельскохозяйственными территориями, которая позволит

перейти от традиционных методов управления мелиорируемыми территориями, к адаптивному регулированию почвенных процессов, для достижения рационального и ресурсоэффективного управления агроэкосистемами. (Абдразаков Ф.К., 2019, Юрченко И.Ф., 2020, Saiz-Rubio V., 2020)

Одним из главных направлений развития и повышения эффективности использования мелиорируемых земель, является развитие цифровых технологий и актуализация созданных ранее решений, для достижения рационального управления агроландшафтами. Проблема информационного обеспечения мелиоративной деятельности заключается в том, что проводимые исследования разрозненны, результаты исследований не приведены к современному единому информационному формату и отсутствует системный подход к решению данной проблемы. Решением данной проблемы является создание единой информационной системы «Цифровая мелиорация», которая позволит повысить оперативность принятия управленческих решений при проведении мелиоративных работ на всех стадиях жизненного цикла мелиоративной системы. (рисунок 1.2) (Якушев В.П., 2019, Щедрин В.Н. и др., 2020, Аржанухина Е.В., 2021)



Применение технологий точного земледелия на орошаемых территориях позволит снизить затраты на единицу товаров агропромышленного производства, повысить эффективность проведения агротехнических мероприятий, повысить экологическую безопасность, что приведет к рациональному управлению мелиорируемыми землями. (Якушев В.П. и др., 2017, Гришаева О.Ю., Замаховский М.П., Ольгаренко Г.В., 2022)

1.2 Применение прецизионных методов в орошаемом земледелии

Принципы точного земледелия представляют собой концепцию управления агропромышленным комплексом, основанную на учете пространственной неоднородности агроландшафтов. Прецизионное земледелие основывается на таких методах как, дифференцированное управление ресурсами, средства сбора и анализа данных. Применение методов точного земледелия позволяет перейти от расчета усредненных агротехнических решений к управлению элементарными участками поля с учетом их показателей. Внедрение таких методов в орошаемое земледелие, способствует рациональному внесению минеральных удобрений, дифференцированному распределению оросительной воды, что повышает эффективность эксплуатации мелиорируемых земель, урожайность и экономическую эффективность сельскохозяйственного производства. (Рожков В.А., 1989, 2002, Якушев В.П., 2002, 2007, 2016, Журавлева Л.А., 2025, Личман Г.И., 2008, Mc Bratney A., 2005, Zhang N., 2002)

Для применения методов прецизионного земледелия на орошаемых территориях, необходимо учитывать почвенно-климатические, геологические и гидрогеологические, организационно-хозяйственные условия произрастания поливных культур, что позволит достичь повышения эффективности использования мелиорируемых территорий за счет снижения затрат на агротехнические мероприятия, увеличения урожайности поливных культур,

снижения интенсивности развития процессов деградации почв. (Фалькович А.С. и др., 2017, Васильев С.М. и др., 2020, Рогачев А.Ф., 2025, Oliver, M., 2013)

Методы прецизионного земледелия можно разделить на последовательные, взаимосвязанные этапы:

1. Сбор данных о состоянии поля (вариабельность почвенного покрова, агрохимические и агрофизические показания состояния поля и т.д.), для получения объективного количества информации требуется применять методы дистанционного диагностики.

2. Анализ полученных данных, при помощи разработки программных средств поддержки принятия решений (СППР) интеллектуально советующих систем (ИСС), программ моделирования почвенных процессов.

3. Цифровое картографирование результатов моделирования, которое будет выступать визуальной составляющей для оценки состояния поля, и распределении его показателей плодородия.

4. Проведение агротехнических мероприятий с применением современной техники, для дозированного распределения минеральных удобрений и оросительной воды по площади орошаемого поля. (Рунов, Б.А., 2012, Бабичев А.Н., и др., 2017)

Цель прецизионного земледелия управлять вариабельностью почвенных характеристик, адаптируя технологии к реальным условиям каждого элементарного участка поля. Переход к прецизионному земледелию необходим для достижения эффективной эксплуатации орошаемых земель, должен базироваться на применение таких методов как комплекс средств информационно-технологической поддержки, ГИС-технологии, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), наземные датчики и специализированное программное обеспечение для автоматизации управления поливом и мелиоративными режимами (Vasilyev S.M., Babichev A.N., Olgarenko V.I., 2021, Волкова, Е.А., 2025).

В своей работе В. И. Ольгаренко, А. Н. Бабичев с соавторами говорят, что основным тезисом точного земледелия является постоянный мониторинг

питательных и водно-физических свойств почвы на каждом микро-сегменте поля. Непосредственно контролируется плотность и влажность почвы, ее твердость и агрегатный состав, содержание в ней микроэлементов и микроорганизмов и их разделение по площади поля. Авторы представляют систему по внесению удобрений и пестицидов, основанную на принципах точного земледелия. Основой системы точного земледелия при орошении является:

- база данных, содержащая информацию о урожайности сельскохозяйственных культур, сроках и количестве агрономических мероприятий по внесению доз удобрений и пестицидов, проведения поливов, которая представляется в координатной системе для каждого микро-сегмента конкретного поля;

- комплекс программного обеспечения, использующийся для графического представления полученной информации, анализирующий ее и помогающий принимать обоснованные управленческие решения по необходимым операциям для каждого микро-сегмента поля по соответствующим координатам;

- технологии и автоматизированные технические устройства для дифференциации внесения доз удобрений, пестицидов и норм орошения в используемой системе позиционирования. (Ольгаренко В.И., Бабичев А.Н., Монастырский В.А., 2018).

В своей работе В. А. Монастырский, А. Н. Бабичев и В. Иг. Ольгаренко представили составление алгоритмов планирования агрокомплекса для обеспечения возможности автоматизации выбора технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур в прецизионном земледелии для оптимизации минерального питания. На основе данного алгоритма была основана компьютерная программа расчета доз внесения удобрений, которая является самостоятельным и обособленным фрагментом комплекса разрабатываемых мероприятий для мониторинга агробиоценозов и

оперативного реагирования на негативные изменения либо потребность в элементах жизнеобеспечения сельскохозяйственных культур.

Авторами были выбраны основные сельскохозяйственные культуры, возделываемые на орошении в Ростовской области, и для них разработаны алгоритмы планирования, позволяющие автоматизировать выбор элементов технологии возделывания. При разработке алгоритмов и создании программы был использован метод, основанный на показателях почвенной диагностики, предполагающий доведение содержания подвижных форм элементов питания в почве до оптимального уровня. Дальнейшее развитие темы, как отмечают авторы, позволит в режиме реального времени производить мониторинг агробиоценозов на предмет содержания в почве питательных веществ и при необходимости в короткие сроки вносить дифференцированные дозы минеральных удобрений на каждый микро-сегмент с учётом реальной потребности выращиваемой сельскохозяйственной культуры (Монастырский и др., 2019).

Для эффективного и рационального управления мелиорируемыми землями необходим переход от традиционных методов земледелия к прецизионным, на основе внедрения геоинформационных технологий (ГИС) и методов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Данный подход дает возможность получения необходимого количества пространственных данных о почвенных характеристиках поля, состоянии возделываемых культур и гидромелиоративной системе, что позволяет принимать наиболее рациональные решения по управлению сельскохозяйственными территориями. (Пронько Н.А., Корсак В.В., 2012, Васильев С.М., Щедрин В.Н. и др., 2019, Дубенок Н.Н. и др., 2022 - 2023, Mulla D. J., 2013)

В своей работе А. М. Зейлигер и О. С. Ермолаева обосновали применение разработанного ими метода оценки водного стресса поливных культур на основе корреляции данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и наземных датчиков, установленных на орошаемых полях. Предложенный метод прецизионного земледелия позволяет своевременно выявлять участки

орошаемого поля с дефицитом влажности и на основе этих данных корректировать режимы орошения сельскохозяйственных культур. Результатом работы стала установленная линейная зависимость между средним значением коэффициента водного стресса растений за период вегетации и урожайностью. (Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., 2021)

Для оценки эффективности орошения с применением данных полученных с наземных датчиков и данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), авторы разработали систему показателей интегрирующую данные об урожайности, глубине расчетного слоя почвы при проведении поливов, фактическую эвапототранспирацию, транспирацию и данные о дефиците испарения полученных с помощью математической модели и данных спутниковых снимков. Полученные результаты позволили классифицировать данные необходимые для экономической оценки технологии прецизионного орошения в условиях Саратовской Заволжья. (Зейлигер А.М., 2023)

Для оценки состояния орошаемых сельскохозяйственных культур на разных фазах развития и прогнозирования урожайности авторы предлагают технологию и интерпретации данных дистанционного зондирования земли, которые позволяют решить практические задачи обеспечения прецизионного земледелия. Цель исследования достигалась путем интерпретации данных ДЗЗ с вычислением нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI). Этот показатель отражает количество фотосинтетически активной биомассы растений и рассчитывается как разность интенсивности отражённого света в красной и ближней инфракрасной областях спектра. Применение данной технологии позволяет получать качественную оценку состояния поливных культур в различные стадии вегетации, выявлять участки переувлажнения, оценивать эффективность работы оросительной техники, прогнозировать урожайности возделываемых культур для целей экономического планирования в сельском хозяйстве. (Михайленко И.М., Якушев В.П., 2016, Демакина И.И., Фисенко Б.В., 2022, Зверьков М.С., 2025, 2026, Gao B. C., 1996)

Для повышения эффективности управления водными ресурсами необходим переход от традиционных методов распределения оросительной воды к интеллектуальным системам, основанным на моделировании мелиоративных процессов, анализе данных и использовании цифровых карт. Такой подход при планировании водораспределения в оросительных системах, позволяет обеспечивать точное соответствие объемов водоподачи и фактической потребности воды возделываемых культур. Таким образом, цифровизация мелиоративной отрасли формирует новый подход к управлению орошаемыми территориями, что позволит рационально расходовать водные ресурсы. (Юрченко И.Ф., 2022, Рогачев Д.А., 2025, Волкова Е.А., 2025, Xing Y., 2025)

Для определения одного из главных параметров состояния орошаемых земель, влажности, предлагается использовать технологии точного земледелия, которые основываются на принципах дистанционного зондирования земли. Была разработана методика оперативного определения влажности орошаемых земель, основанная на применении гиперспектральной аппаратуры. Результатом расчета является значение индекса содержания влаги в почве WBI (Water band index). Для оценки состояния посевов основанной на расчете соотношения мощностей характерных спектральных каналов отраженного от них излучения или спектральных вегетационных индексов (СВИ), предлагается устанавливать мультиспектральные камеры на беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Так же данная технология позволит использовать полученные данные для построения цифровых моделей рельефа, для выявления солонцовых пятен на основе изменений индекса NDVI, что сократит расход на внесение мелиоранта (гипса), путем точного внесения его на конкретный участок орошаемого поля. (Бабичев А.Н. и др., 2017, Корсак В.В. и др., 2021, Рогачев Д.А., 2025)

Для расчета оптимальных режимов орошения сельскохозяйственных культур и планирования водопользования, авторами был разработан программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета, на основе

интеграции данных о почве, метеорологических показателях и расчетных моделях. Такой подход, позволяет обеспечивать рациональное потребление водных ресурсов в условиях их дефицита и своевременно принимать решения по проведению агротехнических мероприятий. Внедрение таких технологий прецизионного земледелия в отдельные хозяйства и оросительные системы, позволяет перейти от рекомендательного к оперативному планированию поливов, основанного на фактической гидрометеорологической обстановке. (Кравчук А.В. и др., 2007, В.И. Ольгаренко и др., 2012, Бородычев В.В., 2015, Митюрева О.Н. и др., 2021, Краснощеков, В.Н. и др., 2024)

Важным аспектом в прецизионном земледелии являются методы математического моделирования почвенных процессов. Ведущей задачей мелиорации является обеспечение оптимального водного режима почвы, предотвращение эрозии, поддержание плодородия, снижение уровня деградации почв. Для решения этих задач подходит применение методов математического моделирования, позволяющие анализировать и прогнозировать развитие процессов в сложных экосистемах. Современные модели позволяют учитывать большое количество факторов, влияющих на продуктивность сельского хозяйства, включая климатические условия, качество почвы, состав удобрений и особенности сельскохозяйственной техники. Применение математических моделей способствует принятию обоснованных управленческих решений, повышению эффективности производства и снижению негативного воздействия на окружающую среду. (Юрченко И.Ф., 2004, Камышева Г.Н. и др., 2012, Шевченко В.А. и др., 2025, Медведев Н.В. и др. 2025)

Традиционные системы орошения, основанные на равномерном распределении воды по площади поля, не учитывают естественную пространственную неоднородность почвенных свойств, гидрогеологических условий и водопотребления культур, что приводит к нерациональному использованию водных ресурсов, развитию процессов вторичного засоления и снижению продуктивности мелиорируемых земель. Выходом из сложившейся

ситуации является внедрение технологий точного (прецизионного) орошения, позволяющих адаптировать распределение водных ресурсов к потребностям каждого микро-сегмента поля. Основой прецизионного орошения являются программные средства расчета пространственно-дифференцированных поливных норм. Данные инструменты позволяют на основе интеграции почвенных, климатических, агротехнических и гидрогеологических данных формировать карты-задания для техники переменного орошения. (Александровская Л.А., 2020, Фисенко Б.В. и др., 2023, Медведев Н.В. и др., 2026)

Перспективным направлением в развитии методов точного земледелия на орошаемых землях является применение технологий интернет вещей (IoT), которые обеспечивают оперативное получение данных от систем датчиков и средств мониторинга состояния агроландшафтов. Использование сенсорных средств мониторинга позволяет получать объективные и оперативные сведения о водно-физических характеристиках почв, метеорологических параметрах, состоянии возделываемых культур и функционировании оросительной системы или ее отдельных элементов. Объединение этих данных в единую базу данных способствует созданию интеллектуальных систем поддержки принятия решений в области эффективного управления орошаемыми массивами. (Юрченко И.Ф., 2021, Камышева Г.Н. и др., 2022, Ан С.И., 2024)

Основным пунктом для перехода к применению прецизионных методов земледелия является разработка программно-информационных средств расчета параметров режимов орошения. Для основных способов орошения была разработана ИСС «Оперативное планирование орошения». Система была предназначена для научно-обоснованного водоснабжения оросительных систем и оперативного планирования поливов. Основой системы является биоклиматический метод расчета водопотребления сельскохозяйственных культур. ИСС ОПО учитывает широкий спектр факторов: климатические, почвенные, гидрогеологические условия, биологические особенности растений. На основе собранных данных система формирует рекомендации по нормам,

срокам и количеству поливов в течение всего вегетационного периода. Основными недостатками данной системы является отсутствие расчета дифференцированных режимов орошения сельскохозяйственных культур, ограниченность алгоритмов расчета режимов орошения и прогнозирования водопотребления, которая затрудняет адаптацию системы к другим условиям сельскохозяйственных угодий. (Остапчик В.П., 1989)

Для климатических условий Саратовского Заволжья была разработана информационно-советующая система по управлению водным режимом орошаемых земель - ИСС «Режимы орошения» (ИСС РО). В основе программы лежит метод определения агрометеорологических параметров не по среднемноголетним данным с использованием модульных коэффициентов перехода к году нужной водообеспеченности (метод И.А. Кузника), а по году-аналогу. Выбор такого метода позволяет рассчитывать, как проектный режим орошения на год необходимой обеспеченности водного баланса, так и эксплуатационный режим орошения на конкретный год. (рисунок 1.3)

ИСС РО дает возможность смоделировать режимы орошения для различных по водообеспеченности лет и провести сравнительный анализ полученных биоклиматических коэффициентов с данными полевых исследований. В основе методики расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур, лежит объективное определение вероятных величин водопотребления с учетом биологии культурных растений, метеорологических, почвенных, гидрогеологических и других природных условий, а также применяемой и планируемой к применению техники и технологии орошения. (Морковин В.Т. и др., 2003)

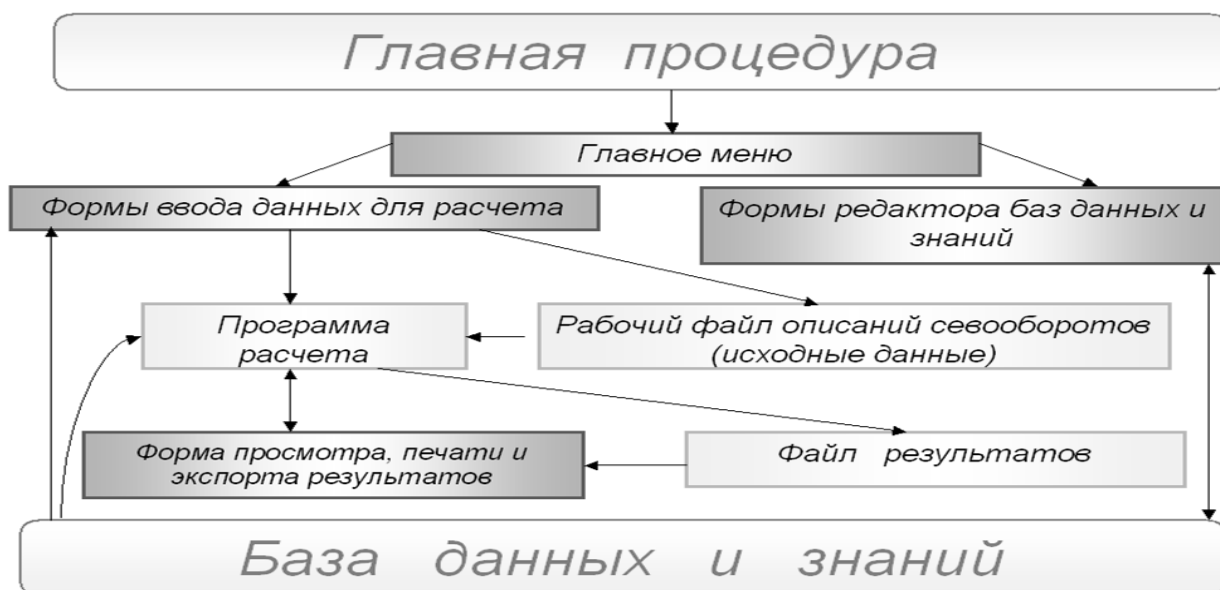


Рисунок 1.3 - Структурная схема программно-информационного обеспечения ИСС «Режимы орошения»

Для оптимального пространственного распределения оросительной воды по площади поля, необходимо применять технологии точного земледелия, которые позволяют учитывать вариабельность водно-физических характеристик почвенного покрова, фазу вегетации, текущие метеорологические условия. Для решения данной проблемы, была разработана компьютерная программа, в основе которой лежат базы данных расчета оптимальных параметров увлажнения расчетного слоя для основных типов почв, поливных культур Саратовского Заволжья. Данная программа интегрирована в автоматизированную систему управления поливами, что позволяет на основе многолетних данных экономить водные ресурсы при проведении поливов, тем самым обеспечивая оптимальный водный режим и равномерное распределение влажности по площади орошаемого поля. (Соловьев Д.А., Корсак В.В. и др., 2021)

Для повышения эффективности и рационального использования водных ресурсов при проведении поливов, развития точного орошаемого земледелия в условиях засушливых районов Поволжья, авторы разработали состав и структуру информационной базы прогнозирования суммарного водопотребления и дефицита водного баланса. Данный подход позволяет

учитывать особенности природно-климатических условий, водно-физические характеристики почвенного покрова, технологии полива для прогнозирования дефицита водного баланса орошаемых земель. (рисунок 1.4) (Корсак В.В. и др., 2023)



Рисунок 1.4 – Структура информационной базы прогнозирования дефицита водного баланса орошаемых посевов для условий засушливого Поволжья

Для мониторинга состояния солевого режима мелиорируемых территорий Саратовского Заволжья, была разработана концепция, основанная на использовании геоинформационных технологиях и методах математического моделирования. Данная система мониторинга адаптирована для условий аридного климата, включая как участки, ранее использовавшиеся под орошение, так и действующие орошаемые земли, а также потенциальные объекты орошения с учетом возможных климатических изменений в сторону повышения аридизации климата на землях Саратовского Заволжья. Для достижения точности, надежности и практической значимости модели рекомендуется применять принципы объектно-ориентированного проектирования и теоретико-методологические основы моделирования. (Пронько Н.А., Корсак В.В., Фалькович А.С., 2009-2011, 2016, Бородычев В.В. и др., 2016)

Важной составляющей для перехода к прецизионным методам земледелия на мелиорируемых территориях является переход к дифференцированному распределению ресурсов по площади орошаемого поля.

Дифференцированное внесение оросительной воды и минеральных удобрений, позволит обеспечивать оптимальный водный и пищевой режимы орошаемых земель. Такой подход позволяет учитывать почвенную пространственную неоднородность условий произрастания поливных культур, тем самым обеспечивая рациональное и ресурсоэффективное управление орошаемыми агроландшафтами. (Зейлигер А.М., 2010, Щедрин В.Н. и др., 2016, Михайленко И.М., 2018)

Важным аспектом для рационального управления орошаемыми землями является переход от традиционных методов проведения поливов, к дифференцированному орошению, суть которого заключается в расчете оптимальной поливной нормы для каждого элементарного участка поля в соответствии с пространственной неоднородностью водно-физических свойств почвы, микрорельефа, состояния растительного покрова и потребностью в воде возделываемых культур в определенную стадию вегетации. Главным отличием от традиционных методов орошения, является возможность изменять интенсивность дождя по зонам управления, что отвечает принципам прецизионного земледелия и стратегии рационального потребления водных ресурсов в условиях их дефицита. (Ольгаренко В.И. и др., 2018, Васильев С.М., 2020, Новиков А.Е., 2024)

Информационной основой для применения технологии дифференцированного полива являются карты пространственного распределения влажности почвы, водопотребления, водного стресса поливных культур по площади орошаемого поля. Карты формируются на основе полученных данных с многоспектральных и тепловых снимков со спутников и БПЛА, показаний с наземных профилографов влажности почвы, цифровых моделей рельефа. (Козенко К.Ю., 2021, Терлеев В.В. и др., 2019, 2023)

Техническая реализация дифференцированного полива на орошаемых территориях осуществляется на основе цифровых карт заданий для широкозахватных дождевальных машин кругового и фронтального действия, на которых применяются системы секторного управления или индивидуальным

управлением клапанами спринклеров, что позволяет регулировать норму по мере движения машины для каждого элементарного участка поля. (Чураев А.А., 2016, Балакай Г.Т., 2018, Бабичев А.Н. и др., 2019 - 2020)

Дифференцированное внесение минеральных удобрений является одним из ключевых методов прецизионного земледелия, который позволяет учитывать внутрипольную пестроту почвенного плодородия и управлять пищевым режимом почв, по средствам оптимального внесения необходимого количества удобрений для роста и развития возделываемых культур. Для поддержания высокого уровня эффективного плодородия орошаемых земель, необходимо внесение, соответствующее выносу элементов питания возделываемых культур, доз минеральных удобрений, величину которых следует определять с учетом уровня их содержания в почве для каждого элементарного участка поля. (Марченко Н. М., 1997, Пронько Н.А., 2001, Сычев В.Г., 2019)

Дифференцированное внесение удобрений с учетом пестроты обеспеченности элементами питания позволяет повысить эффективность внесения удобрений увеличением урожайности в 1,5-2 раза. В условиях высокой вариабельности плодородия внесение усредненных доз удобрений приводит либо к дефициту урожайности на малообеспеченных участках, либо к неоправданным затратам и загрязнению окружающей среды на участках с оптимальным содержанием элементов питания. (Пронько, В.В. И др., 2004, Shchuklina O., 2021)

Для успешной реализации дифференцированного внесения минеральных удобрений в системе прецизионных методов земледелия на орошаемых территориях, необходимо обладать актуальной и объективной информацией об обеспеченности поливных культур элементами минерального питания. Основным минус традиционных методов определения состояния эффективного плодородия почв, временной промежуток между отбором проб и получением результатов агрохимического анализа почв. В связи с этим, дистанционные методы диагностики, основанные на анализе спектрально-отражательных характеристик растительного покрова, являются наиболее актуальными для

сбора данных об состоянии посевов. Наибольшую значимость в определении состояния азотного питания растений, представляют вегетационные индексы, основанные на соотношении отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра: NDVI (нормализованный вегетационный индекс), NDRE и NNI (специализированные индексы для азота). (Афанасьев, Р.А., 2019-2020, Сычев В.Г. и др., 2007, 2020, Щуклина О.А. и др., 2021)

1.3 Создание цифровых карт орошаемых земель

Для формирования цифрового двойника орошаемого поля, необходимо создание точной, географически привязанной, многослойной цифровой карты, которая выступает геопространственной основой и местом хранения необходимого набора атрибутивных данных, для моделирования почвенных процессов и визуализации распределения показателей по площади орошаемого поля.

Создание цифровых карт сельскохозяйственных земель носит комплексный подход, связывающий методологии, разработанные ведущими научными школами РФ, закрепляя их в государственных стандартах и нормативно правовых актах.

Цифровые карты сельскохозяйственных угодий служат основой для точных расчетов площадей земель, предназначенных для сельского хозяйства, и содержат важные сведения о местоположении, конфигурации и площади этих угодий. К основным качествам данных, используемых в процессе принятия решений, относятся их актуальность, полнота и объективность. (Чиж Д.А. и др., 2009, Рожков В.А., 2010)

На современном этапе научного развития создание цифровых карт помогает решить проблемы агроклиматического и агромелиоративного районирования орошаемых земель, которое требует мониторинга большого объема данных, таких как распределение суммы активного тепла, объема осадков, дефицита влажности воздуха, уровня гумуса, глубины гумусового

горизонта и степени засоления земель. Регулярное наблюдение за этими параметрами позволяет оценивать изменение состояния орошаемой территории и прогнозировать возможные изменения в будущем. На основе этих данных можно рекомендовать эффективные мелиоративные, агротехнические и организационно-управленческие мероприятия. Тем не менее, это требует обработки больших объемов информации и учета взаимосвязей между показателями. (Молчанов Э.Н. и др., 2010, Ганченко В.В., 2017, Фисенко Б.В. и др., 2019)

Оптимальный состав цифровой карты орошаемых полей Поволжья, должен включать в себя основные группы слоев: инфраструктура (населенные пункты, дороги); гидромелиоративная система (каналы, насосные станции, трубопроводы, орошаемые поля, гидранты, лесополосы); гидрография и рельеф (реки, озера, овраги, горизонтали); геология; почвенная карта; места отбора проб (точки отбора почвенных проб, скважины наблюдений за грунтовыми водами). Автор говорит о важности выбора способа создания большинства слоев, предложенный вариант-векторизация по экранной подложке топографических и специальных карт, космических снимков, схем строительства и реконструкции орошаемых участков. Для создания карт предлагается выбирать, программу которая будет позволять создавать не только цифровую карту, но и включать в себя средства трехмерного моделирования рельефа земной поверхности, а также различные инструменты, позволяющие выполнять интерполирование значений путем изучения взаимосвязей между всеми опорными точками, такими опциями обладает программный комплекс ArGIS DeskTop фирмы ERSI (США). (Корсак В.В., 2009)

В основе прецизионных методов орошаемого земледелия лежит применения геоинформационных систем (ГИС). Географическая информационная система (ГИС) — это автоматизированная система сбора, хранения, обработки, анализа и представления пространственно привязанной информации. Она позволяет эффективно управлять территориально распределенными объектами и

процессами путем интеграции картографической основы с атрибутивной информацией. (Корсак В.В. и др., 2014)

Основные компоненты ГИС включают:

1.Аппаратное обеспечение: компьютеры и периферийные устройства, необходимые для ввода, обработки и вывода данных.

2.Программное обеспечение: специализированное ПО для управления базами данных, картографии и анализа пространственных данных.

3.Данные: географически привязанные объекты и явления, представленные в цифровой форме.

4.Методы и алгоритмы: методы пространственного анализа, моделирования и визуализации данных.

5.Пользователи: специалисты, использующие систему для решения конкретных задач.

Таким образом, ГИС представляет собой комплексную технологию, обеспечивающую интеграцию пространственных данных и методов их анализа для принятия обоснованных решений в различных сферах человеческой деятельности. (ДеМерс М.Н., 1999)

Важность мониторинга мелиоративного состояния земель, обусловлена необходимостью оптимального распределения водных ресурсов и поддержания высокого уровня плодородия почвы. Особенно остро эта задача встает в условиях аридного климата сухостепных районов Саратовского Заволжья, характеризующимися высокими рисками деградации земель и ограниченными запасами воды, вследствие неправильного подхода к управлению мелиорацией агроландшафтов. (Пронько Н.А. и др., 2008, 2010)

Основой мониторинга является комплексный подход, который включает полевые наблюдения и современные дистанционно-картографические методы. Ключевыми преимуществами такого подхода к решению проблем состояния мелиоративных земель являются: возможность сбора большого объема данных и своевременное их обновление, позволяющее быстро принимать решения, снижение затрат на проведение исследований, повышение точности оценки

благодаря применению пространственных моделей и цифрового картографирования. (Пронько Н.А., Корсак В.В., Корнева Т.В., 2008)

Значимость инновационных инструментов мониторинга и анализа данных для объективной оценки текущего состояния мелиоративных земель обусловлена ценностью данных технологий в зонах интенсивного земледелия, где большие нагрузки на почву требуют оперативного принятия решений, для недопущения ухудшения ее свойств. В основу методологии данного подхода входит создание цифровых карт орошаемых массивов, построение аналитических моделей, позволяющих выявлять зоны потенциального снижения плодородия земель, основываясь на эти данные, можно оперативно принимать решения по улучшению качества мелиоративных земель. Авторы акцентируют внимание на особенностях реализации проектов по оценке плодородия земель в рамках конкретных регионов, учитывая специфику рельефа, состава почв, режимы орошения и погодные условия. Примеры реализованных проектов показывают значительную экономическую выгоду от внедрения ГИС-технологий, поскольку позволяют избежать необоснованного расхода минеральных удобрений и оптимизировать затраты на поливной режим. (Заигралов Ю.А., Афонин В.В., Корсак В.В. и др., 2018)

В своей работе авторы подняли вопрос организации эффективных механизмов контроля и управления мелиорированными территориями, который является ключевым фактором устойчивого функционирования аграрного сектора экономики региона. Применение инновационных подходов, основанных на современных компьютерных системах и методиках создания цифровых карт сельскохозяйственных угодий, обеспечивает повышение уровня информированности органов власти и принятие грамотных управленческих решений.

Основа предложенной авторами концепции являются современные геоинформационные технологии и системы поддержки принятия решений (СППР). Особое внимание уделено вопросам автоматизации процесса сбора данных, обработке больших массивов информации и визуализации результатов

анализа. Основой разработанной системы служит цифровая карта района исследований, содержащая комплекс слоев различной тематической направленности: гидрогеология, почва, растительность, климатические условия и антропогенные факторы.

Ключевыми элементами, структуры представленной ГИС выступают:

- Базовая географическая основа;
- Тематические слои данных;
- Инструменты пространственного анализа;
- Механизмы визуализации и интерпретации полученных результатов.

Предложенная концепция позволила создать универсальный инструмент поддержки управления мелиоративной отраслью, способствующий повышению качества принимаемых решений путем оперативного предоставления актуальной информации пользователям разного уровня компетенции. Система интегрирована с существующими базами данных и поддерживает механизм обновления данных в режиме реального времени, обеспечивая оперативный доступ к необходимой информации. Таким образом, внедрение подобного инструмента позволит существенно повысить эффективность управления процессом восстановления плодородия земель и обеспечить устойчивое развитие сельского хозяйства региона. (Пронько Н.А. и др., 2009, 2010)

Цифровые модели рельефа (ЦМР) являются ключевым инструментом при районировании, они выступают в качестве цифрового описания рельефа местности, всех понижениях, повышениях, впадинах. Исходными данными для проектирования ЦМР является векторизация готовых картографических изображений и данных геодезических изысканий. Так данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), данные со спутников отображаются в формате растров (элементарные участки поля). (Фисенко Б.В., 2020)

Для получения оптимальной и актуальной информации об орошаемых землях, об их границах, возделываемых культурах, для моделирования процессов и автоматизации управления мелиорируемыми территориями,

авторы предлагают разрабатывать цифровую карту объекта исследований. Предложенный подход по созданию цифровой карты оросительной системы является ключевым звеном методики цифровизации мелиорированных земель и гидротехнических сооружений. Разработанный ими алгоритм создания цифровой карты позволяет получать быстрый доступ к необходимым данным, проводить пространственный и сравнительный анализы для выявления проблемных зон, что способствует повышению эффективности управления орошаемыми землями. (Мячин М.А., Воеводина Л.А., 2025)

Для мониторинга сельскохозяйственных угодий, наблюдением за урожайностью возделываемых культур, необходимо применять технологии создания цифровых карт. Технологии ГИС в агропромышленном комплексе помогают обеспечивать абсолютную точность координат, что помогает наглядно видеть распределение различного рода показателей по площадям мелиорируемых территорий. Для минимизации воздействия на окружающую среду и увеличение урожайности, необходимо накладывать на цифровую карту различные слои данных, таких как тип почвы, водно-физические характеристики, метеорологические условия, схемы севооборота и т.д. Применение данных технологий позволило создать цифровые карты распределения метеорологических условий и урожайности по площадям Саратовской области, что наглядно показывает наиболее благоприятные для возделывания сельскохозяйственной продукции территории. (Демакина И.И., Фисенко Б.В., 2025, Мячин М.А., Воеводина Л.А., 2025)

1.4 Цифровые двойники и их использование в сельском хозяйстве

Принятый недавно ГОСТ Р 57700.37—2021 определяет цифровой двойник (ЦД) как систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с ним или его составными частями, естественно в случае наличия этого изделия. Под цифровой моделью в этом государственном стандарте России подразумевается некоторая система или

совокупность компьютерных математических моделей и электронных документов, которые описывают функции, структуру и поведение создаваемого или находящегося в процессе эксплуатации объекта на разных этапах жизненного цикла. Обязательным требованием для такой системы моделей и документов является оценка соответствия предъявляемым требованиям, выполненная на основании результатов испытаний, первое из которых – адекватность модели, то есть соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик. (ГОСТ Р 57700.37—2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения)

Технология цифровых двойников возникла в середине XX века и изначально использовалась NASA в форме высокоточных симуляторов для подготовки астронавтов. В сельскохозяйственной индустрии развитие цифровых двойников прошло четыре последовательных этапа (рисунок 1.5). В первом периоде, продолжавшемся с 1960-х годов до 2002-го, цифровые двойники представляли собой примитивные, однонаправленные модели, слабо соответствующие реальным физическим объектам и практически не обладающие необходимой степенью информационной насыщенности. (Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., 2023, Сосфенов Д.А., Шахова М.С., 2023)



Рисунок 1.5 - Концепция цифровых двойников в сельском хозяйстве. Этапы развития

Цифровой двойник является динамической цифровой копией физического объекта или процесса, которая формируется за счет интеграции данных мониторинга, сенсорных датчиков, вычислительных методов и моделирования процессов. Основными технологиями для реализации цифрового двойника физического объекта или процесса, являются технологии интернет вещей (IoT), искусственный интеллект, хранение и анализ больших данных (Big data), методы математического моделирования. Данный подход имеет больше значение для развития сельского хозяйства, где технологии цифровых двойников могут использоваться для создания виртуальных моделей объектов мелиоративной отрасли, полей, техники, процессов. (Wolfert S., 2017, Kritzing W., 2018, A. Fuller, 2020, Jones D., 2020, Медведев Н.В. и др., 2026)

Важным аспектом в определении цифрового двойника, является его отличие от цифровой модели и цифровой тени. Основным условием в создании цифрового двойника является двунаправленный обмен данными между физическим объектом и его цифровой версией. Цифровой двойник, подобно цифровой тени, имеет виртуальное представление, которое наглядно

показывает изменения в состоянии объекта моделирования (физический объект), применимо к созданию цифрового двойника сельскохозяйственного назначения, пользователь видит изменения, связанные с проведением агротехнических мероприятий (проведенный полив, внесение удобрений), изменения метеорологических условий и т.д. Отличительной особенностью от цифровой тени, является то, что цифровой двойник может влиять на физический объект, путем интеграции результатов моделирования. (Эшпулатов Д.Б., 2023, Корсак В.В. и др., 2023, Parageorgas P., 2023)

Агропромышленный комплекс обладает значительным потенциалом для разработки и внедрения технологий цифровых двойников в производство, за счет большого объема данных, получаемых за счет средств дистанционного зондирования земли, беспилотных летательных аппаратов, датчиков состояния почвы и посевов, метеостанций. Цифровой двойник в сельскохозяйственном производстве является цифровым представлением отдельного элемента агропромышленной системы (поле, ферма, теплица), связанного с физическим объектом через двусторонний обмен данными. Разработка цифровых двойников сельскохозяйственного назначения для оптимизации потребления ресурсов, прогнозирования урожайности, управления состоянием почв и возделываемых культур, является наиболее актуальным направлением исследований, которое приведет к рациональному управлению сельскохозяйственным производством. (Рогачев А.Ф., 2025, Медведев Н.В. и др., 2026, Pylianidis C., 2021)

Цифровой двойник меняет подход к управлению почвой и орошением, обеспечивая возможности мониторинга, моделирования и оптимизации процессов в реальном времени. Данная технология базируется на данных из нескольких источников, таких как датчики, дистанционное зондирование и метеостанции, для создания цифровой копии почвенных систем и орошения. В области управления орошением цифровые двойники включают в себя детальные представления об оросительной системе, влажности почвы и потребностях культур в питании. Интеграция данных в реальном времени

позволяет точно назначать сроки полива, гарантируя, что культуры получают оптимальное количество воды и удобрений, тем самым сокращая потери и повышая урожайность. (Subeesh A., Naveen Chauhan, 2025).

Применение технологий цифрового двойника орошаемого поля, основанного на моделировании процесса потери влаги растениями за вегетационный период, позволяет существенно сократить потребление водных ресурсов при проведении поливов, основываясь на состоянии поливных культур и данных полученных с установленных в почве датчиков. Данная модель может быть использована для расчетов поливных и оросительных норм и для отслеживания состояния развития растений. (Сафонова Т.В. и др., 2023, Lu Y. et al, 2020)

Di Maggio A., Spadaro D., Linsalata F приходят к выводу, что для рационального управления водными ресурсами, необходимо применять технологии цифровых двойников, которые моделируют почвенные процессы в реальном времени, обеспечивают нормированное распределение оросительной воды по площади орошаемого поля и позволяют прогнозировать изменения и принимать обоснованные решения при назначении агротехнических мероприятий. На данном этапе развития технологии создания цифровых двойников сельскохозяйственного направления можно разделить на два основных направления:

Цифровые двойники, применяемые для мониторинга (состояние почвы, распределение показателей потенциального и эффективного плодородия, распределение влажности и т. д).

Прогностические цифровые двойники, которые обеспечивают эффективное и рациональное распределение водных ресурсов при проведении поливов. (Di Maggio A., Spadaro D., Linsalata F. et al., 2025, Subeesh A., 2025)

Выводы по первой главе

1. Переход от традиционных методов земледелия на орошаемых территориях к прецизионным, обусловлен, в первую очередь

неэффективностью традиционного подхода, который не учитывает почвенную пространственную неоднородность условий произрастания поливных культур.

2. Создание цифровых карт орошаемых полей является основой для визуализации и мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, тем самым помогая принимать более оперативные решения по проведению агротехнических мероприятий.

3. Технологии цифровых двойников орошаемых полей, являются наиболее современным и рациональным методом управления орошаемыми полями, позволяющим учитывать особенности конкретного участка, разделять поле на микро-сегменты и тем самым вести рациональное управление водными ресурсами и минеральными удобрениями.

4. Несмотря, на достаточно обширное количество исследований в данной области, не было исследовано и разработано инструмента управления орошаемыми полями для условий Саратовского Заволжья, которое входит в зону аридного климата и где орошение является оптимальным методом ведения сельского хозяйства. Разработка цифрового двойника орошаемого поля, адаптированного к природно-климатическим условиям Саратовского Заволжья, является актуальной задачей.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОРОШАЕМОГО ПОЛЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ САРАТОВСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ

2.1 Концепция цифрового двойника орошаемого поля

Обоснование целесообразности применения прецизионных методов земледелия, а именно разработку технологии цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья, должно осуществляться только во взаимодействии с расширенной информацией о пространственном распределении геоморфологических, агрофизических и агрохимических, мелиоративных и гидрогеологических, агротехнических и вегетационных показателей поливных массивов.

Цифровой двойник орошаемого поля рассматривается как динамическая виртуальная информационно-моделирующая система, которая позволяет рассмотреть структуру, функционирование и спрогнозировать изменения конкретного орошаемого участка и решать задачи управления водным и пищевым режимами мелиорируемой территории. В условиях Саратовского Заволжья концепция разработки цифрового двойника орошаемого поля должна учитывать такие факторы произрастания поливных культур как, аридный климат, высокую пестроту почвенного плодородия, вариабельность водно-физических характеристик почв, риски вторичного засоления и осолонцевания почв, микрорельеф, а также необходимость нормирования внесения оросительной воды в условиях дефицита естественных осадков.

Для сохранения природного потенциала и ресурсоэффективного управления мелиорируемыми землями, необходимо придерживаться следующим принципам создания и ведения системы управления орошаемым полем на основе разработки его цифрового двойника.

Принцип комплексности – атрибутивная база цифрового двойника орошаемого поля должна быть наполнена оптимальным количеством

информации о пространственном распределении основных показателей и характеристик объекта исследований, для обеспечения рационального принятия решений по распределению ресурсов, сохранению плодородия и поддержания экологической устойчивости орошаемых территорий. Обеспечение комплексности получаемой информации об эколого-мелиоративном состоянии орошаемого поля, должно основываться на оптимальных данных для конкретных природно-климатических условий расположения агроландшафта.

Для оптимальной оценки состояния распределения показателей потенциального и эффективного плодородия почв орошаемого поля, необходимо учитывать почвенную пространственную неоднородность условий произрастания поливных культур. Важным аспектом в оценке состояния распределения основных элементов питания по площади орошаемого поля, является отбор оптимального количества проб при проведении агрохимического анализа. (рисунок 2.1) (Корсак В.В. и др., 2023)

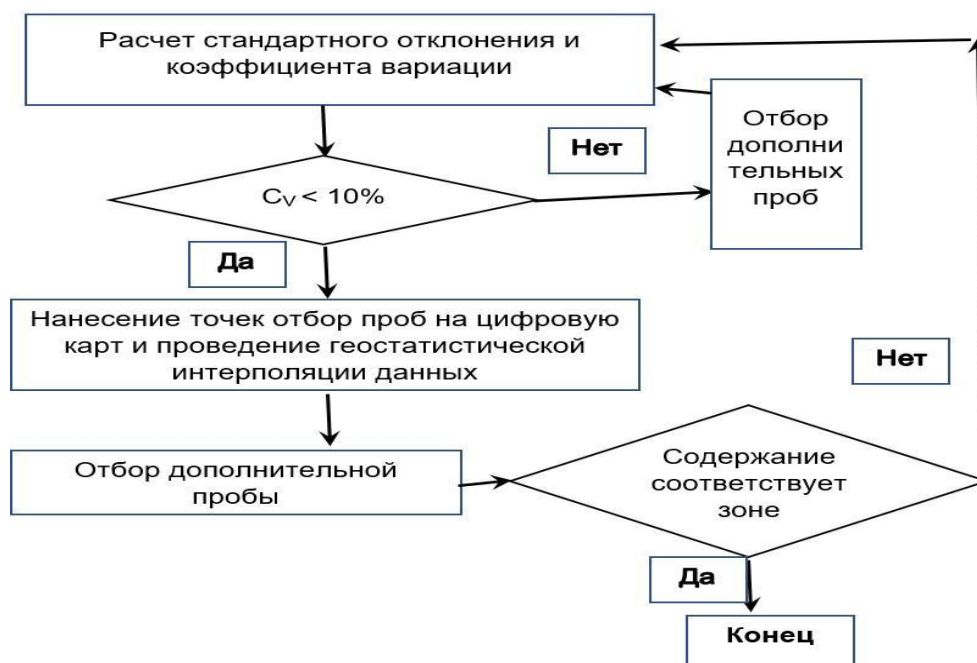


Рисунок 2.1 - Блок-схема алгоритма определения оптимального количества агрохимических проб

Высокая пространственная вариативность показателей плодородия почв Саратовского Заволжья, обусловленная как природными факторами (комплексность почвенного покрова, рельеф), так и длительным орошением без

учета неоднородности условий произрастания сельскохозяйственных культур.
(рисунок 2.2)



Рисунок 2.2 - Факторы формирования пестроты почвенного плодородия на орошаемых землях Саратовского Заволжья

Так же, для оптимальной работы цифрового двойника орошаемого поля, необходимы данные о мелиоративном состоянии агроландшафта (риски вторичного засоления и осолнения почв, уровне грунтовых вод), информация о загрязнении почв, архивные данные о проведенных агротехнических мероприятиях (сроки и нормы поливов, дозы внесения минеральных удобрений, обработки почв), информация о возделываемых культурах (архивные данные о прошлых годах, сорт, фазы вегетации), учет этих показателей позволит получить комплексную интегрированную оценку об эколого-мелиоративном состоянии орошаемых земель. Основные показатели наблюдений сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Рекомендуемый состав наблюдаемых показателей для комплексной оценки эколого-мелиоративного состояния орошаемых агроландшафтов Саратовского Заволжья

Группа показателей	Показатель	Объект наблюдений
Агрохимические	Потенциальное плодородие	Содержание, запасы, тенденции их изменения и баланс гумуса для пахотного слоя почвы
	Эффективное плодородие	Обеспеченность пахотного слоя почвы доступным азотом (нитрификационная способность)
		Содержание, запасы, тенденции их изменения и балансы доступного фосфора и обменного калия для пахотного слоя почвы
	Загрязнение почв	Содержание в пахотном слое почвы тяжелых металлов (свинец, ртуть, цинк, медь, кадмий, никель) и мышьяка
		Возможные источники и пути загрязнения
Мелиоративные	Засоление почв	Результаты анализа полной водной вытяжки для метрового слоя почвы, тип и степень засоления
	Осолонцевание почв	Емкость катионного обмена (ЕКО) и состав обменных оснований в почвенном поглощающем комплексе
	Грунтовые воды	Уровень, химизм и минерализация грунтовых вод
Технологические	Состав севооборотов	Возделываемые культуры и их урожайность
		Дозы и виды вносимых органических и минеральных удобрений
		Режимы орошения
		Поливные и оросительные нормы
		Дозы и виды вносимых химических мелиорантов
		Дозы и виды вносимых средств химической защиты растений
	Техническое состояние оросительной сети, насосных станций и поливной техники	Протяженность трубопроводов, марки и степень износа труб, состояние гидротехнических сооружений на сети. Параметры и состояние насосных станций. Виды, технические характеристики и состояние поливной техники

Принцип локальности и геопространственности – цифровой двойник орошаемого поля, разработанный для ресурсоэффективного управления

мелиорируемыми землями, должен ориентироваться на эксплуатацию в рамках отдельно взятого поля и учитывать характерные для данной территории природно-климатические условия, информацию о почвенном покрове, распределении показателей плодородия, для учета вариабельности данных показателей и оптимальной оценки состояния почвы.

При разработке программного и информационного обеспечения цифрового двойника орошаемого поля необходимо учитывать пространственное расположение источников данных. Основой прецизионного земледелия является возможность управления каждым элементарным участком орошаемого поля, для достижения этого условия, все данные получаемые с агроландшафта (почвенные разрезы, места отбора проб, скважины, места установленных датчиков и метеостанций, координаты расположения техники, точные границы орошаемого поля) должны быть точечными и географически привязанными.

Информация о антропогенном воздействии на орошаемое поле (данные о культуре, дозы минеральных удобрений, поливные нормы) и данные необходимые для принятия решений (уровень влажности почвы, уровень содержания основных элементов питания) является площадной, относящейся к конкретному участку орошаемого поля. Для перехода от фактических точечных данных к не прерывному распределению данных по всей площади поля, необходимо использовать методы математической интерполяции пространственных данных. Такой переход возможен только при наличии точных географически привязанных координат каждой точки отбора проб. Оптимизировать данный переход позволяет создание цифровых карт и применение средств дистанционного зондирования земли. Для решения различных прогнозных задач необходим учет рельефа местности, для чего необходимы средства создания цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Принцип системного единства и замкнутого цикла управления – является основополагающим, так как, он отличает цифровой двойник орошаемого поля от цифровой тени, имитационных моделей, цифровых карт и

баз данных, суть разработки цифрового двойника заключается в объединении всех компонентов – физический объект (орошаемое поле, IoT-устройства, агротехника), потоки разнородных данных (метеопрогнозы, результаты анализов, данные с датчиков данные дистанционного зондирования), комплекс моделирующих процессов (программы расчета) и систему поддержки принятия решений в единую целостную систему управления, которая привязана к конкретному орошаемому полю и не может функционировать без него.

Не один из компонентов не может полноценно функционировать вне этой системы, модели не смогут давать оптимальные расчеты без постоянного обмена информации, а назначение агротехнических мероприятий (проведение поливов, внесение минеральных удобрений) не может быть рациональным и ресурсоэффективным без обратной связи о состоянии орошаемого поля. Концепция цифрового двойника орошаемого поля представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Концепция цифрового двойника орошаемого поля

Для условий Саратовского Заволжья системное единство проявляется в взаимосвязи водного, солевого и питательного балансов почвы, выражается это при назначении поливов, нельзя рассчитывать поливные нормы исходя только от дефицита влаги, необходимо учитывать подъем уровня грунтовых вод и

вызываемое им засоление почв, которое сказывается на доступности питательных веществ.

Замкнутый цикл управления заключается в последовательности этапов функционирования цифрового двойника орошаемого поля, которые циклически повторяются в заданном временном промежутке, от нескольких часов (оперативный режим работы) до нескольких суток (прогнозный режим работы) на протяжении всего вегетационного периода. (рисунок 2.4)

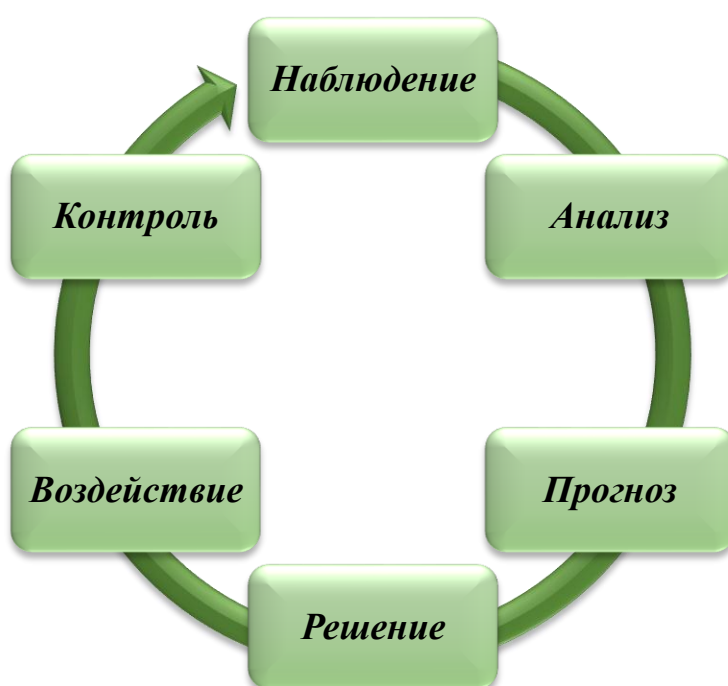


Рисунок 2.4 – Схема функционирования цифрового двойника орошаемого поля

2.2 Разработка цифровой карты и атрибутивной базы данных цифрового двойника орошаемого поля

Цифровизация агропромышленного комплекса открывает широкие перспективы для повышения эффективности управления орошаемыми землями, а именно разработка цифрового двойника орошаемого поля предусматривает наблюдение за большим объемом различных данных.

Для рационального использования технологий цифрового двойника орошаемого поля, необходимо иметь массив данных о таких показателях как: рельеф, почвенный покров, климатические и погодные данные, агрохимическое

и агрофизическое состояние почв, данные о культуре, данные об оросительной системе, местах отбора проб и установленных lot-устройств. Наблюдение за этими показателями позволяют дать оптимальное количество информации об орошаемом поле и позволяют цифровому двойнику оценивать состояние поля, прогнозировать его изменения, а также, составлять рекомендации по назначению агротехнических мероприятий.

Для визуализации распределения всех показателей по площади орошаемого поля и для определения взаимовлияния одних показателей на другие, необходимо создать цифровую карту и атрибутивную базу данных цифрового двойника орошаемого поля. В данной главе подробно рассматривается концепция создания цифровой карты и атрибутивной базы данных для хранения информации цифрового двойника орошаемого поля, этапы сбора, предварительной очистки и анализа пространственных данных.

Цифровая карта орошаемого поля, является геоинформационной платформой, состоящей из различных пространственных данных о месте проведения исследований, ее создание позволяет повысить точность и оперативность принятия решений при назначении агротехнических мероприятий, сократить расход водных ресурсов и оптимизировать процессы управления орошаемым полем. На основе собранных данных создаются следующие слои цифровой карты (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Основные слои цифровой карты орошаемого поля

Название слоя	Компоненты	Тип
Базовый слой	Границы поля	Vector – polygon
	Координаты опорных точек	Vector – point
Рельеф	Цифровая модель рельефа	Raster – матрица высот рельефа
		TIN – высотные отметки
	Экспозиция склонов	Raster – экспозиция
	Крутизна склонов	Raster – уклоны
	Изолинии высот	Vector – polygon
Почвенный покров	Картограммы распределения типов почв	Vector – polygon
	Картограммы распределения водно-физических свойств почв	Vector – polygon
Данные дистанционного зондирования	Индексы распределения влажности и растительности	Raster – индексы
	Тепловые карты	Raster – тепловые карты
Метеоданные	Места расположения метеостанций	Vector – point
	Картограммы распределения среднегоголетних сумм осадков, эффективных температур, дефицитов влажности воздуха, средних значений ГТК теплого периода года в виде растров, полученные по цифровым моделям распространения показателей	Raster – интерполяционные поверхности
Агрономические данные	Карты расположения культур и их сортов по площади орошаемого поля	Vector – polygon
	Карты расположения зон внесения удобрений	Vector – polygon
Оросительная система	Расположение каналов, насосной станции, дождевальной техники	Vector – line (каналы) Vector – point (дождевальная техника)
	Карты фактического распределения поливных норм по площади поля	Raster – распределение поливных норм

Цифровая карта является геопространственной основой цифрового двойника орошаемого поля. Она не просто визуализирует данные, но и служит инструментом для пространственного анализа, зонирования и точного земледелия.

Структура цифровой карты должна быть многослойной и интегрировать как векторные (границы, точки, линии), так и растровые (изображения) данные. (рисунок 2.5) Цифровая карта организуется в виде геоинформационной

системы (ГИС) с использованием программного обеспечения, такого как ArcGIS, QGIS или ENVI.

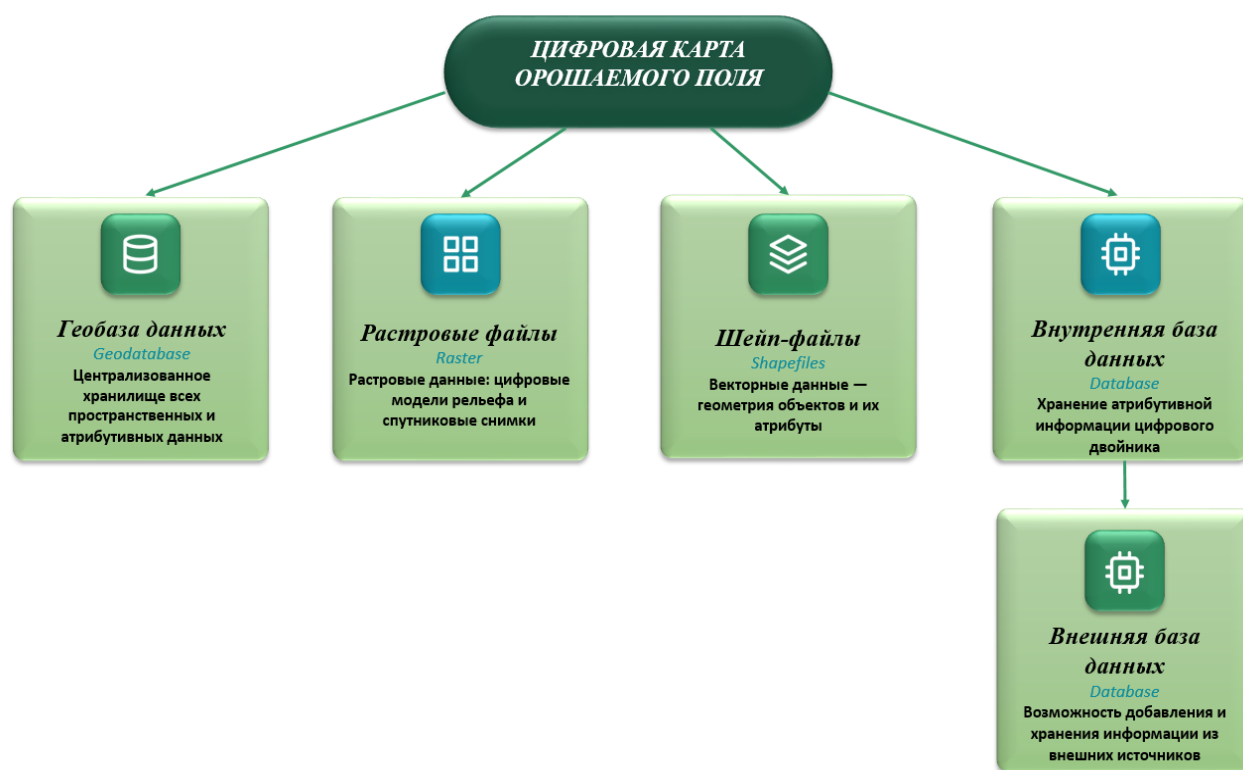


Рисунок 2.5 – Структура цифровой карты орошаемого поля

При создании цифровой карты орошаемого поля необходимо руководствоваться следующими нормативами:

1. ГОСТ Р 70318–2022. Инфраструктура пространственных данных. Единая электронная картографическая основа. Общие требования.
2. ГОСТ Р 51605–2023. Карты цифровые топографические. Общие требования.
3. ГОСТ Р 51608–2024. Карты цифровые топографические. Требования к качеству.
4. ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат.
5. ГОСТ Р 70611–2022. Мелиорация земель. Методика оценки дистанционными методами технического и экологического состояния. — Москва: Стандартинформ, 2022.

ГОСТ Р 70611–2022 рассматривает цифровую карту орошаемых территорий как, многослойную геоинформационную систему, предназначенную для инвентаризации, мониторинга, оценки состояния и планирования эксплуатации мелиоративных объектов. В цифровом двойнике эти компоненты выступают визуальной основой, которая взаимодействует с блоком моделирования процессов и атрибутивными данными, что позволяет наглядно получать актуальную информацию о состоянии поля и распределении почвенных характеристик по его площади.

Для создания цифровой карты орошаемого поля, необходимо собрать следующие типы данных:

1. Данные о топографии орошаемого поля, для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) орошаемого поля;
2. Спутниковые снимки (Sentinel-2, Landsat) для анализа состояния растительности и для разделения поля на элементарные участки с различным уровнем влажности;
3. Геодезические данные (точные координаты границ поля, элементов оросительной системы, мест отбора проб, мест установки датчиков);

Для определения точных координат границ поля и его компонентов использовали навигатор с приемником GPS/GLONASS фирмы Garmin марки GPSMAP 64st, позволяющий обеспечивать точность определения координат до трех метров. Данный прибор использует систему координат WGS-84, для корректной работы необходимо выполнять преобразования координат из данной системы сначала в систему ПЗ-90.11 по следующим формулам:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ПЗ-90.11}} = [1 + (-0,008)10^{-6}] \begin{bmatrix} 1 - 2,041066 \times 10^{-6} - 1,716240 \times 10^{-8} \\ +2,041066 \times 10^{-6} 1 - 1,115071 \times 10^{-8} \\ +1,716240 \times 10^{-6} + 1,115071 \times 10^{-8} 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{wgs-84}} + \begin{bmatrix} -0,003 \\ -0,001 \\ 0,000 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

После необходимо перевести в референционную систему координат Российской Федерации ГСК-2011, по формуле:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ГСК-2011}} = [1 - (-0,0006)10^{-6}] \begin{bmatrix} 1 - 2,569513 \times 10^{-10} - 9,21146 \times 10^{-11} \\ +2,569513 \times 10^{-10} 1 - 2,72465 \times 10^{-9} \\ +9,211460 \times 10^{-11} - 2,72465 \times 10^{-9} 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ПЗ-90.11}} - \begin{bmatrix} 0,000 \\ +0,014 \\ -0,008 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

4. Почвенные данные (тип/подтип почвы, водно-физические характеристики);
5. Метеорологические данные (температура, осадки, испаряемость, влажность воздуха);
6. Агрохимические данные почвы (содержание основных элементов питания(NPK), содержание гумуса, кислотность);
7. Данные о культуре (вид культуры, сорт, фаза вегетации, даты посадки/уборки).

Атрибутивная база данных представляет собой хранилище непространственной информации, связанной с элементами цифровой карты. Для каждого объекта (например, участок поля, оросительный канал) задается набор данных. (Колесникова В. М., 2010, Корсак В.В. и др. 2024)

Методика сбора данных:

1. Географические координаты. Для точной привязки границ поля, необходимо определить точные координаты расположения поля, с помощью GPS-навигатора или данных из карт и планов конкретного хозяйства.
2. Рельеф опытного участка. Для корректного моделирования процессов, необходимо собрать информацию об особенностях рельефа орошаемого поля (уклоны, понижения, возвышенности), при помощи мультиспектральной съемки с БПЛА и использовании данных дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ).
3. Гидрологические условия опытного участка. Для корректировки проведения поливов, необходимо учитывать гидрологические особенности участка проведения исследования (расположения источника воды, скважин, дренажной системы).
4. Почвенные характеристики опытного участка. Для определения оптимального режима орошения и корректировки внесения минеральных удобрений, необходимо собрать данные о типе почвы, водно-физических характеристик и информацию об основных элементах питания (гумус, NPK).

Методика анализа данных:

1. Предварительная очистка, обработка и интеграция данных. Полученные данные после предварительной очистки необходимо интегрировать в атрибутивную базу данных.
2. Визуализация собранных данных. После интеграции информации, создается цифровая карты орошаемого поля с пространственным распределением всех характеристик.
3. Анализ собранных данных. Для выявления взаимосвязей между различными характеристиками опытного участка, необходимо применять такие методы как, статистические методы, корреляционный и регрессионный анализы.

Атрибутивная база данных хранения и использования информации цифрового двойника орошаемого поля должна основываться на реляционной модели данных базирующаяся на понятии отношения. Отношение – это двумерная таблица, в которой содержатся данные, имеются строки (записи) и столбцы (колонки). При разработке атрибутивной базы данных цифрового двойника орошаемого поля основывались на правилах нормализации базы данных, для приведения ее к нормальным формам, которые необходимы для повышения эффективности использования данных, обеспечения комплексности и непротиворечивости.

Структура атрибутивной базы данных разработана с учетом потребностей цифрового двойника, который должен интегрировать статические, динамические, операционные и прогностические данные. (рисунок 2.6)

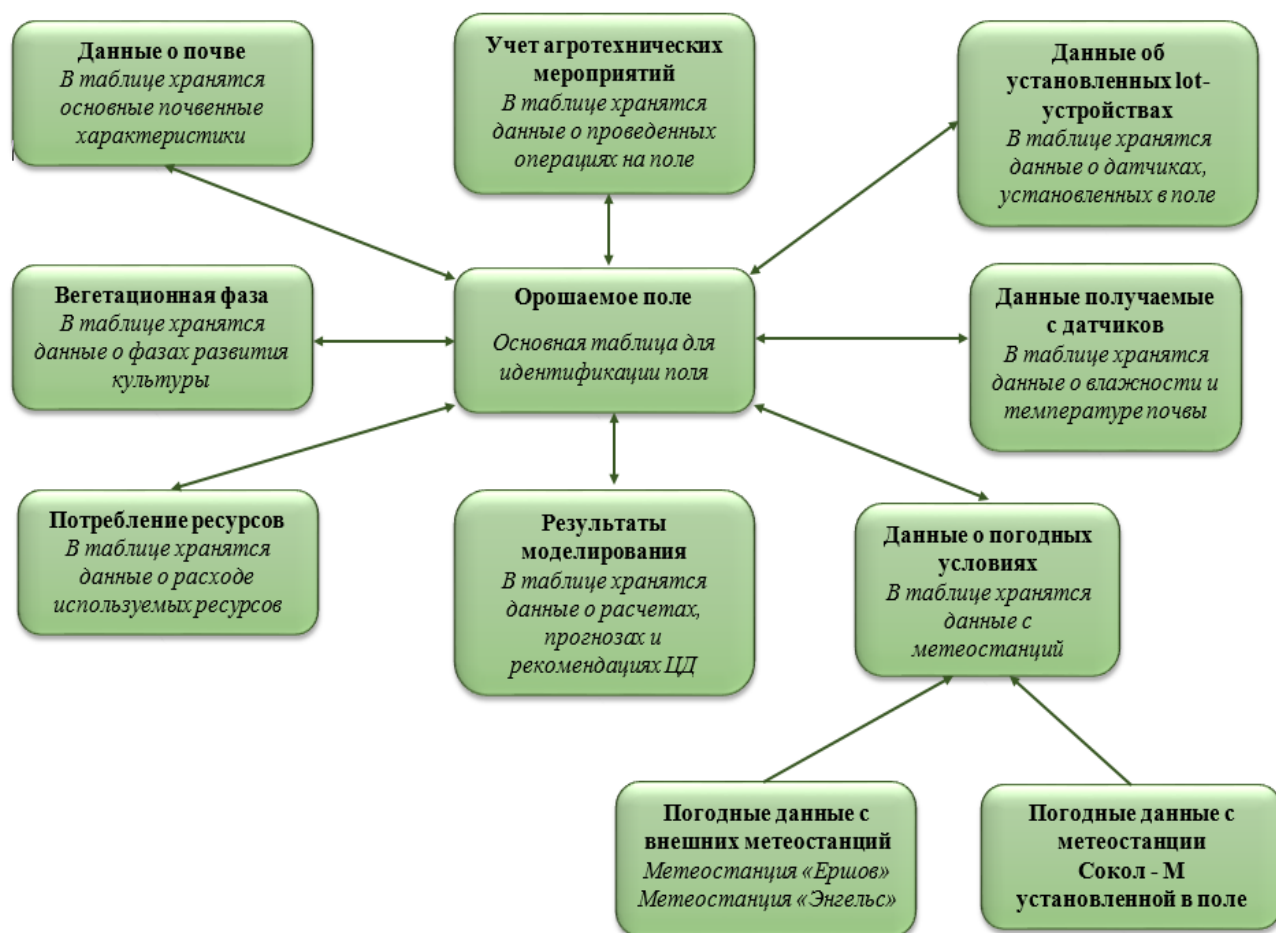


Рисунок 2.6 - Структура атрибутивной базы данных цифрового двойника орошаемого поля

2.3 Определение структуры и состава цифрового двойника орошаемого поля

Структура цифрового двойника орошаемого поля представляет собой многоуровневую и комплексную систему, которая состоит из различных компонентов, позволяющих обеспечить понимание состояния поля, прогнозировать его изменения и оптимизировать процессы управления. (рисунок 2.7)

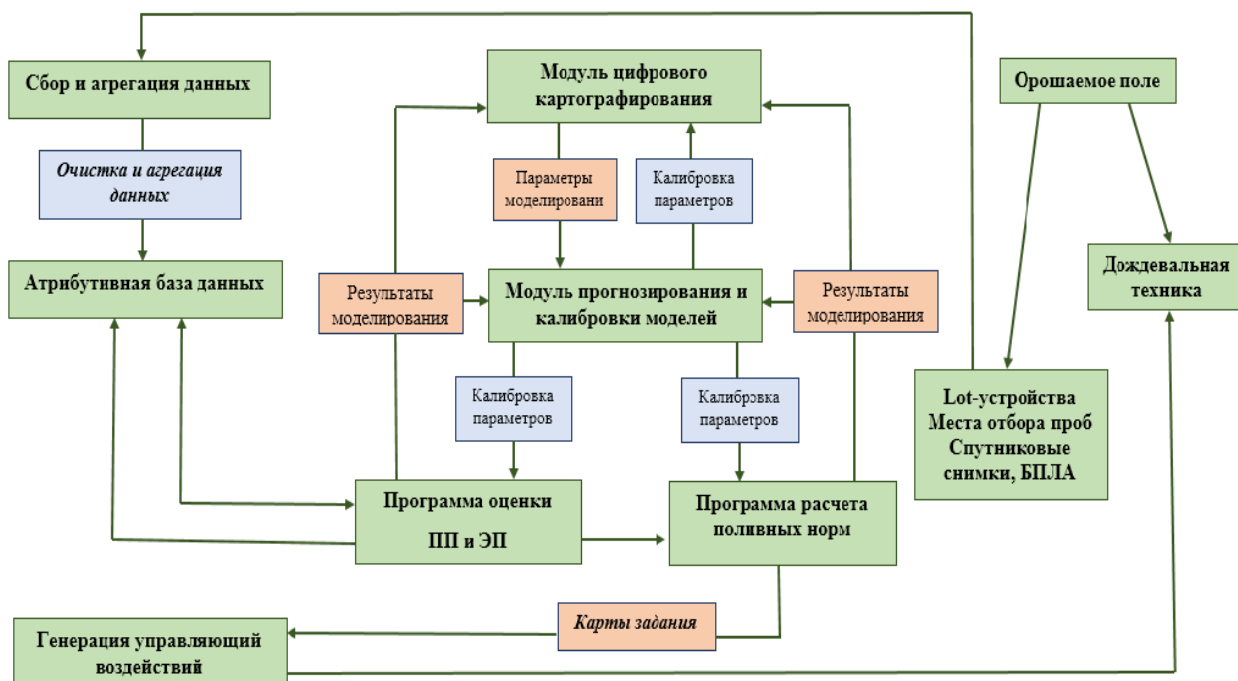


Рисунок 2.7 – Структура цифрового двойника орошаемого поля

Состав цифрового двойника:

Технический блок – блок, предназначенный для сбора данных о физических объектах, необходимых для моделирования происходящих в них процессов; (рисунок 2.8):

1. Орошаемое поле;
2. Датчики (профилографы влажности, метеостанции);
3. Места отбора проб;
4. Дождевальная техника.

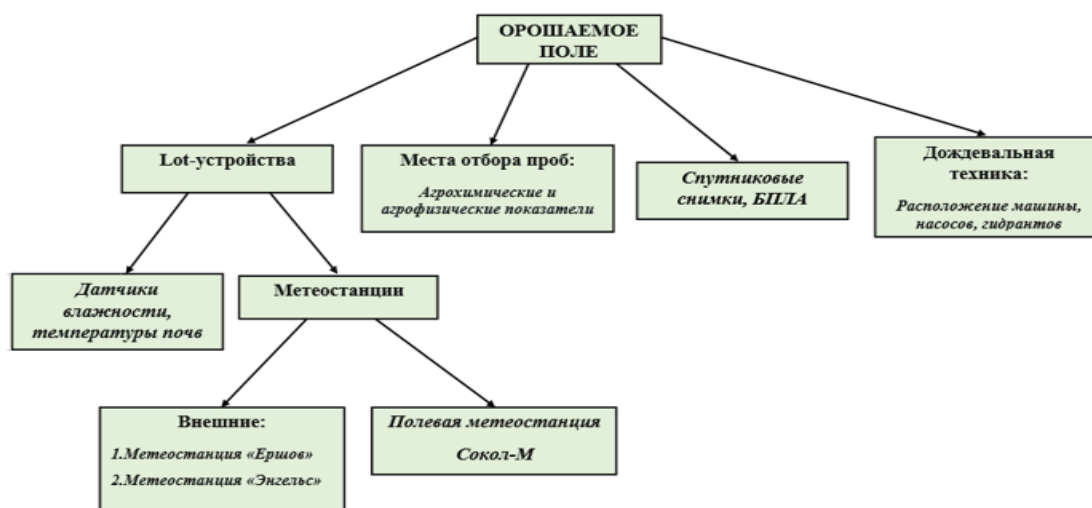


Рисунок 2.8 - Технический блок ЦД орошаемого поля

Блок моделирования процессов представляет собой комплекс взаимосвязанных математических моделей и алгоритмов, воспроизводящих поведение физического объекта, его состав представлен на рисунке 2.9.

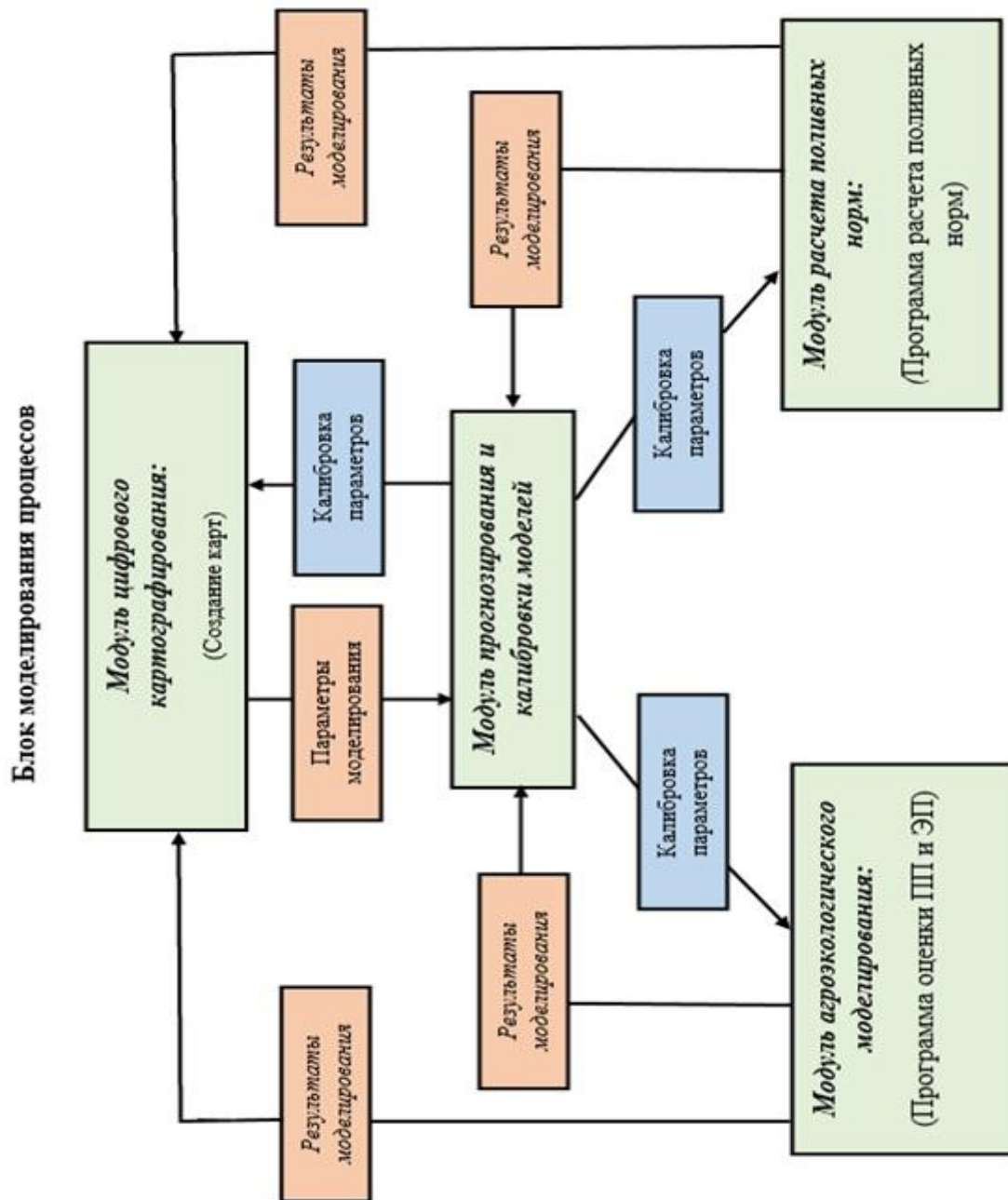


Рисунок 2.9 - Структура блока моделирования процессов ЦД орошаемого поля

Модуль цифрового картографирования: создание и актуализация цифровых карт полей на основе данных ДЗЗ, БПЛА и наземных съемок.

Модуль цифрового картографирования формирует и непрерывно актуализирует пространственно-привязанную основу цифрового двойника, объединяя данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), данные полученные с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных

инструментальных съёмок. Входными потоками служат мультиспектральные снимки Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м, периодичность 5 суток), цифровую модель рельефа, полученную с БПЛА (разрешение до 5 см), а также результаты наземного агрохимического обследования (геопревязанные точечные пробы).

Результатом работы модуля является набор актуализируемых цифровых карт, образующих базовые слои атрибутивной базы данных: карта почвенных разностей и гранулометрического состава, карта содержания основных элементов питания (азот, фосфор, калий) и гумуса, карта водно-физических свойств (НВ, ВЗ, плотность, коэффициент фильтрации), цифровая модель рельефа с производными (уклоны, экспозиция).

Модуль прогнозирования и калибровки моделей: прогнозирование временных рядов, выявление аномалий, адаптивная калибровка моделей.

Модуль прогнозирования и калибровки моделей обеспечивает адаптивность ЦД к изменяющимся условиям окружающей среды и накопление статистических данных для повышения точности прогнозов. Функционально модуль решает три задачи: краткосрочное и среднесрочное прогнозирование временных рядов, выявление аномалий в данных мониторинга и автоматическую калибровку параметров расчётных моделей.

Модуль агроэкологического моделирования: моделирование распределения состояния потенциального и эффективного плодородия.

В рамках ЦД плодородие рассматривается не как статичная величина, а как динамическая система, разделенная на два ключевых блока: потенциальное и эффективное плодородие.

Все почвенные характеристики имеют различные единицы измерения и диапазоны значений. Для их сопоставления и объединения в интегральный индекс необходимо привести каждый показатель к безразмерной шкале, например, от 0 до 1. В программе используются методы нормировки в зависимости от характера распределения данных:

1. Минимальная-максимальная нормализация

$$X_{\text{норм}} = \frac{X - X_{\text{мин}}}{X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}}} \quad (2.3)$$

Где:

X - исходное значения показателя в конкретной точке;

$X_{\text{мин}}$ - минимальное значение показателя по всему полю;

$X_{\text{макс}}$ - максимальное значение показателя по всему полю.

2. Нормировка с учетом зональных оптимальных значений (для агрохимических показателей)

$$X_{\text{норм}} = \begin{cases} \frac{X}{X_{\text{опт}}} \rightarrow X \leq X_{\text{опт}} \\ \frac{X_{\text{макс}} - X}{X_{\text{макс}} - X_{\text{опт}}} \rightarrow X > X_{\text{опт}} \end{cases} \quad (2.4)$$

Где:

X - исходное значения показателя в конкретной точке;

$X_{\text{макс}}$ - максимальное значение показателя по всему полю;

$X_{\text{опт}}$ - оптимальное значение элемента, для выбранного подтипа почв и выбранной культуры.

3. Логистическая функция (для показателей, где есть оптимальное значение и резкое ухудшение при отклонении, например, pH):

$$X_{\text{норм}} = \frac{1}{1 + e^{-k(X - X_0)}} \quad (2.5)$$

Расчет потенциального плодородия. Потенциальное плодородие отражает устойчивые во времени свойства почвы, сформированные в процессе почвообразования и мало изменяющиеся под влиянием текущей агротехники. Для условий Саратовского Заволжья ключевыми факторами потенциального плодородия являются: гранулометрический состав, содержание гумуса, емкость катионного обмена, степень засоления и осолонцевания, а также гидрогеологические условия (глубина залегания уровня грунтовых вод).

$$PFI = \omega_1 \times H_{\text{норм}} + \omega_2 \times T_{\text{норм}} + \omega_3 \times CEC_{\text{норм}} + \omega_4 \times S_{\text{норм}} + \omega_5 \times D_{\text{норм}} \quad (2.6)$$

Где:

$H_{\text{норм}}$ - нормированное содержание гумуса в пахотном слое (%)

$T_{\text{норм}}$ - нормированный гранулометрический состав (содержание физической глины, частиц $<0,01$ мм, %).

$CEC_{\text{норм}}$ - нормированная емкость катионного обмена (мг-экв/100 г почвы).

$S_{\text{норм}}$ - нормированный показатель степени засоления.

$D_{\text{норм}}$ - нормированный показатель глубины залегания грунтовых вод (УГВ), м.

ω_i - коэффициенты PFI, отражающие вклад каждого фактора в потенциальное плодородие (задаются экспертно), должны удовлетворять условию: $\sum \omega_i = 1$

Гумус определяет запасы органического вещества в почве, для темно-каштановых почв Саратовского Заволжья, характерны низкие значения (1,5-3,5%), нормировка проводится исходя из максимального регионального значения для такого типа почв (4%).

Гранулометрический состав влияет на влагоемкость, поглонительную способность, устойчивость к засолению. Легкие почвы (супеси) имеют низкое потенциальное плодородие из-за малой влагоемкости, тяжелые (глины) — высокое, но при орошении могут быть подвержены риску засоления. Для Саратовского Заволжья диапазон варьируется от 10 до 60%.

Емкость катионного обмена (ЕКО) характеризует способность почвы удерживать питательные элементы (Ca, Mg, K, Na) и противостоять засолению почв. Высокая ЕКО (>30) характерна для черноземовидных почв, низкая (<15) для легких и солонцеватых почв. Нормировка данного показателя - линейная.

Глубина залегания грунтовых вод. В условиях орошения близкие грунтовые воды (менее 2-3 м) вызывают подтопление, вторичное засоление,

ухудшают аэрацию. Поэтому используется обратная зависимость: чем глубже УГВ, тем выше вклад.

Весовые коэффициенты ω_i отражают вклад каждого фактора в потенциальное плодородие каждого участка поля. Их значения определяются:

Методом экспертной оценки: на основе зональных многолетних значений и рекомендаций. Для Саратовского Заволжья ведущими факторами являются гумус и гранулометрический состав (веса 0,3 и 0,25), затем ЕКО (0,2), засоление (0,15), УГВ (0,07), геоморфология (0,03).

Методом главных компонент (РСА): веса пропорциональны доле объясненной дисперсии первых главных компонент, построенных по корреляционной матрице показателей потенциального плодородия.

Регрессионным анализом: если имеются данные о многолетней урожайности на схожих по значениям участках, предоставляется возможность оценить вклад каждого фактора в урожайность и использовать коэффициенты регрессии (после нормировки) в качестве весов.

Расчет эффективного плодородия. Эффективное плодородие характеризует текущее состояние питательного режима почв, влагообеспеченности, которое может быть быстро изменено под воздействием агротехнических мероприятий (внесение удобрений, поливы). Для его расчета используются показатели, динамичные во времени (NPK, запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое).

$$EFI = v_1 \times N_{\text{норм}} + v_2 \times P_{\text{норм}} + v_3 \times K_{\text{норм}} + v_4 \times W_{\text{норм}} \quad (2.7)$$

Где:

$N_{\text{норм}}$ - нормированное содержание нитратного азота (N-NO₃) мг/кг.

$P_{\text{норм}}$ - нормированное содержание подвижного фосфора (P₂O₅) мг/кг.

$K_{\text{норм}}$ - нормированное содержание обменного калия (K₂O) мг/кг.

$W_{\text{норм}}$ - нормированные запасы продуктивной влаги в метровом слое (мм).

v_i – коэффициенты EFI, отражающие вклад каждого фактора в эффективное плодородие (задаются экспертно).

Нитратный азот ($N-NO_3$) — наиболее подвижный элемент, лимитирующий рост в ранние фазы вегетации культур. Нормализация с учетом зональных значений (зерновые оптимально 15–25 мг/кг). Избыток (>45 мг/кг) может быть вреден из-за накопления нитратов, поэтому используется двусторонняя нормировка данного показателя.

Подвижный фосфор (P_2O_5) — на темно-каштановых почвах часто находится в дефиците. Оптимум для большинства растений 20–30 мг/кг. Превышение оптимального значения не критично, но при очень высоких значениях (>65 мг/кг) нормировка ограничивается единицей.

Обменный калий (K_2O) — на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья имеет большую обеспеченность, но на легких по гранулометрическому составу почвах может быть дефицит. Оптимальное значение 200–300 мг/кг. Нормализация по такому же принципу как фосфор.

Запасы продуктивной влаги в метровом слое (мм) — Саратовское Заволжье входит в зону аридного климата и в этих условиях это является, критическим фактором.

Рассчитывается по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{B3}) \times h_i \quad (2.8)$$

Где:

θ_i - текущая влажность;

θ_{B3} - влажность завядания;

h_i – мощность расчетного слоя.

Нормализация линейная относительно наименьшей влагоемкости. В орошаемых условиях $W_{\text{норм}}$ может отражать как естественные запасы влаги, так и результат предшествующих поливов.

Выходными данными модуля агроэкологического моделирования являются: растровые карты пространственного распределения каждого

показателя плодородия (гумус, N, P, K), карта управляющих зон для дифференцированного внесения удобрений.

Модуль расчета поливных норм: многокритериальная оптимизация режимов орошения.

В основу модуля расчета пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля положена модифицированная формула А.Н. Костякова, представленная в виде функции координат (x, y) для каждой элементарной ячейки поля.

$$m(x, y) = 100 \times h_{(x,y)} \times \rho_{(x,y)} \times (W_{\text{нв}(x,y)} - W_{\text{факт}(x,y)}) \quad (2.9)$$

Где:

m- поливная норма, м³/га;

h- глубина расчетного слоя почвы, м;

ρ - плотность почвы, г/см³;

(x, y) -координаты конкретного участка поля;

$W_{\text{нв}}$ - влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости почвы, % от массы;

$W_{\text{факт}}$ - динамический параметр влажности, зависящий от времени (t), получаемый путем интерполяции данных с датчиков влажности и спутниковых снимков.

Выходные данные модуля: пространственная карта распределения поливных норм. Растровое изображение или векторные полигоны с указанием требуемой нормы полива (в мм или м³ на га) для каждой ячейки поля.

В единой системе четыре описанных модуля образуют замкнутый информационный контур, обеспечивающий непрерывную актуализацию данных, моделирование ключевых агрофизических процессов, прогнозирование и адаптивную калибровку моделей, а также выработку и исполнение оптимальных управляющих решений по дифференцированному орошению.

Блок хранения данных и взаимодействия обеспечивает двунаправленный обмен данными между техническим блоком и блоком моделирования процессов. Он включает системы телеметрии (LPWAN, 4G), атрибутивную базу данных и блок генерации управляющих воздействий.

Разработанная структура ЦД орошаемого поля соответствует определению полноценного цифрового двойника, предполагающему двунаправленный автоматический обмен данными между физическим объектом и его цифровой моделью.

2.4 Программа оценки пространственного распределения состояния потенциального и эффективного плодородия почв орошаемого поля

Основа программы оценки пространственного распределения плодородия почв для цифрового двойника (ЦД) базируется на интеграции генетического почвоведения, теории пространственного анализа (геостатистики) и концепции лимитирующих факторов.

Цель программы - создание цифровых карт пространственного распределения показателей плодородия для принятия обоснованных решений по управлению орошаемыми почвами.

В рамках цифрового двойника плодородие рассматривается не как статичная величина, а как динамическая система, разделенная на два ключевых блока: потенциальное и эффективное плодородие.

Потенциальное плодородие: Обусловлено природными свойствами почвы (гранулометрический состав, содержание органического вещества, тип почвы, запас макро и микроэлементов).

Эффективное плодородие: Текущее состояние почвы, которое напрямую влияет на урожайность (доступные формы элементов питания, влажность, pH, засоленность). Динамично меняется под воздействием агротехнических мероприятий и погодных условий.

Для алгоритмов цифрового двойника эти два понятия разграничиваются по следующему принципу:

Потенциальное плодородие (статическая составляющая цифрового двойника). В основе блока потенциального плодородия лежат фундаментальные закономерности почвенных процессов, характерные для темно-каштановых почв Саратовского Заволжья. Именно они задают генетически обусловленный максимум продуктивности конкретного поля, который нельзя превзойти даже при самой совершенной агротехнике, не изменив структуру самой почвы. В разрабатываемой программе этот блок реализуется через такие константные параметры, как содержание гумуса, гранулометрический состав (определяющий ёмкость поглощения и водно-физические свойства почвы), тип почвы и глубину залегания уровня грунтовых вод. Функционально этот раздел цифрового двойника отвечает за научно обоснованное мелиоративное микрорайонирование территории – то есть за выделение участков со сходными данными распределения плодородия.

Эффективное плодородие (динамическая составляющая цифрового двойника). В отличие от потенциального, эффективное плодородие отражает ту часть почвенных свойств, которая меняется под влиянием текущих агротехнических приёмов, погодных условий и орошения. Его теоретической базой служат классические положения физиологии питания растений и теории динамического равновесия почвенных растворов, согласно которым доступность элементов питания и влаги зависит от их подвижных форм, находящихся в постоянном обмене.

В алгоритмы цифрового двойника этот блок вводится через измеряемые в реальном времени (или с заданной дискретностью) параметры: содержание доступных растениям форм азота, доступного фосфора и обменного калия (NPK), актуальную влажность корнеобитаемого слоя, концентрацию солей в почвенном растворе (показатель засоления) и температуру почвы. Роль этого динамического блока – оперативное, почти интерактивное управление продукционным процессом: именно на его основе

принимаются решения о сроках и нормах поливов, о необходимости внесения минеральных удобрений и проведения других агротехнических мероприятий.

Для эффективной работы ЦД необходимо наполнить атрибутивную базу данных информацией, на основе которой будут осуществляться моделирование процессов, формироваться карты задания, предлагаться рекомендации по проведению агротехнических мероприятий.

Из проведенного анализа, следует отметить, что на орошаемых полях опытного участка потенциальное плодородие почв характеризуется как низкое, многие участки содержат гумуса ниже зональных значений.

На основе программы оценки пространственного распределения состояния потенциального и эффективного плодородия почв орошаемого поля создаются интерактивные карты пространственного распределения показателей плодородия для принятия обоснованных решений по управлению почвами и орошением.

Основные модули программы:

Модуль сбора и предварительная обработка данных: основная задача, сбор всех типов данных, необходимых для моделирования текущего распределения показателей потенциального и эффективного плодородия по площади орошаемого поля.

1. Геопространственные данные поля:

- Границы поля: координаты расположения поля;
- Цифровая модель рельефа: для анализа уклонов, экспозиции, микрорельефа;
- Гидрологическая сеть: каналы, дренаж;
- Местоположения точек отбора проб;
- Местоположения стационарных датчиков (профилографы влажности, метеостанция).

2. Результаты лабораторных анализов почвы:

- Содержание органического вещества;

- Гранулометрический состав (проценты песка, ила, глины);
- Агрофизические показатели почвы (влажность, плотность, НВ);
- Агрохимические показатели содержания основных элементов питания ($N-NO_3$, P_2O_5 , K_2O мг/кг);

- Уровень кислотности почвы (рН).

3. Данные с датчиков и спутников:

- Почвенные датчики: Влажность почвы (объемная/массовая), температура почвы, ЕС почвы.;
- Спутниковые/БПЛА снимки: Индексы растительности (NDVI, NDRE, EVI), тепловые карты поверхности;
- Метеоданные: Осадки, температура воздуха, влажность воздуха, солнечная радиация (для расчета ET).

4. Данные о культуре и агротехнических мероприятиях:

- Тип культуры;
- Сорт;
- Даты посева/уборки;
- Объемы и виды внесенных удобрений/поливной воды.

Предварительная обработка данных:

- Выявление ошибок в координатах;
- Приведение к единой системе координат и разрешению: Все геопространственные данные должны быть в одной проекции и с согласованным разрешением;
- Интерполяция/экстраполяция: Для показаний датчиков и точечных лабораторных анализов;
- Расчет агрегированных показателей: Например, средняя влажность почвы за период, суммарные осадки.

Модуль пространственного анализа распределения потенциального плодородия почв: основная задача, создание карты пространственного

распределения показателей потенциального плодородия по площади орошаемого поля.

Основные функции:

1. Создание карт распределения основных показателей потенциального плодородия:

- Содержание органического вещества;
- Гранулометрический состав;
- Емкость катионного обмена;
- Уровень засоления почв;
- Уровень залегания грунтовых вод.

2. Анализ рельефа орошаемого поля:

- Расчет: Уклонов, впадин, возвышенностей, экспозиция;
- Результат: пространственные карты микрорельефа;
- Интерпретация: Связь микрорельефа с перераспределением

влаги.

3. Расчет индекса потенциального плодородия (PFI):

Создание индекса потенциального плодородия почв путем взвешенного суммирования нескольких ключевых показателей.

Модуль оценки эффективного плодородия и динамики его изменения: основная задача оценка текущего распределения показателей эффективного плодородия и выявление проблемных зон. Результат работы модуля:

1. Картограммы распределения показателей основных элементов питания ($N-NO_3$, P_2O_5 , K_2O мг/кг) по площади орошаемого поля.

Модуль интеграции и визуализация результатов (ГИС-платформа): основная задача, создание карт распределения индекса эффективного плодородия почв (EFI) по площади орошаемого поля.

1. ГИС-интерфейс:

- Отображение слоев: Все созданные растровые и векторные карты должны быть доступны для наложения друг на друга;
- Интерактивность: Возможность запроса информации по каждому элементарному участку орошаемого поля.

2. Инструменты анализа и зонирования:

- Создание зон управления: Пользователь может интерактивно выделять зоны на основе комбинации различных карт;
- Сравнение карт за разные периоды или сравнение разных показателей.

3. Отчеты и рекомендации:

- Автоматическое формирование отчетов: На основе анализа данных (Обнаружен дефицит влаги в зоне X, требуется полив 50 мм);
- Визуализация рекомендаций: Нанесение на карту рекомендованных действий (например, контуры зон для дифференцированного внесения удобрений).

Модуль поддержки принятия решений и оптимизации процесса управления: главной задачей является визуализация результатов моделирования пространственного распределения показателей плодородия почв, в конкретные решения при проведении агротехнических мероприятий.

Программа оценки пространственного распределения плодородия почв орошаемого поля приводятся два интегральных показателя: индекс потенциального плодородия (PFI) и индекс эффективного плодородия (EFI), расчет этих показателей основывается на нормировке исходных значений, назначении весовых коэффициентов и приведение к единой системе оценке распределения этих показателей.

Расчет индекса потенциального плодородия (PFI): потенциальное плодородие отражает устойчивые во времени свойства почвы, сформированные в процессе почвообразования и мало изменяющиеся под влиянием текущей агротехники. Для условий Саратовского Заволжья

ключевыми факторами потенциального плодородия являются: гранулометрический состав, содержание гумуса, емкость катионного обмена, степень засоления и осолонцевания, а также гидрогеологические условия (глубина залегания уровня грунтовых вод).

Карта PFI относительно стабильна во времени и используется для долгосрочного планирования агротехнических мероприятий и оценки состояния почв.

Расчет индекса эффективного плодородия (EFI): эффективное плодородие характеризует текущее состояние питательного режима почв, влагообеспеченности, которое может быть быстро изменено под воздействием агротехнических мероприятий (внесение удобрений, поливы). Для его расчета используются показатели, динамичные во времени.

После расчета PFI и EFI для каждого элементарного участка поля формируется карта значений от 0 до 1, которая классифицируется на категории:

- 0,0 - 0,3 низкий уровень (сильно засоленные, солонцы, пески, участки с близкими засоленными грунтовыми водами);
- 0,3 - 0,6 средний уровень (каштановые почвы среднего механического состава, слабозасоленные);
- 0,6 - 0,8 приемлемый уровень (темно-каштановые, лугово-каштановые, незасоленные);
- 0,8 - 1,0 высокий уровень (черноземовидные, пойменные, оптимальные условия).

Эта программа представляет собой комплексный подход к управлению плодородием почв орошаемого поля, переходя от простой визуализации к глубокому пространственному анализу и формированию конкретных рекомендаций. Интеграция с цифровым двойником позволяет не только отслеживать текущее состояние, но и прогнозировать его изменения, оптимизировать использование ресурсов и повышать урожайность.

2.5 Программа расчета пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля

Программа предназначена для точного расчета и пространственного распределения дифференцированных поливных норм по площади орошаемого поля. Программа интегрирует данные о почве, рельефе, метеорологических условиях, культуре, влажности почвы и других факторах для создания детализированных карт предписаний для систем точного орошения.

Программа является ключевым инструментом для устойчивого и ресурсоэффективного сельского хозяйства в условиях орошения, особенно актуальна для Саратовского Заволжья, входящего в зону аридного климата и дефицита водных ресурсов.

Основные модули программы:

1. Модуль ввода и управления данными

Основные функции:

- Импорт статических растров: Цифровая модель рельефа (ЦМР), карта распределения почвенных разностей, карта плотности почв, карта распределения НВ, карты потенциального плодородия (PFI).
- Импорт данных с профилографов влажности почвы
- Приём спутниковых данных (Sentinel-1 SAR для влажности, Sentinel-2 для вегетации, Landsat тепловой).
- Импорт метеорологических данных (осадки, температура, ветер, испаряемость, влажность) с ближайшей метеостанции или полевой метеостанции.
- Управление правами доступа и очистка данных.

2. Модуль предварительной обработки и визуализации

Основные функции:

- Пространственная фильтрация и интерполяция точечных данных (влажность почвы с профилографов) на всю сетку поля методом кригинга с учётом особенностей рельефа.
- Интерполяция данных — там, где датчиков мало, используются спутниковые данные с поправкой на NDVI.
- Сглаживание выбросов (механические повреждения датчиков, облачность на снимках).
- Визуализация текущей карты влажности $W_{\text{факт}}(x, y, t)$ и отклонения от НВ.

Результат работы: карта пространственного распределения текущей влажности почв $W_{\text{факт}}(x, y, t)$, по площади орошаемого поля.

2. Модуль зонирования поля:

Основная задача, разделить поле на элементарные участки с близкими значениями и привязать карту индексы потенциального (PFI) и эффективного плодородия (EFI). Алгоритмы зонирования поля представлен на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Алгоритм зонирования поля

Результат работы модуля: карта пространственного распределения водно-физических свойств почв (h , γ , $HВ$), для каждого элементарного участка орошаемого поля.

3. Модуль расчета водного баланса и поливных норм

Данный модуль является основной частью работы программы пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля. Алгоритм работы модуля имеет два режима: прогнозный, фактический.

Работа в прогнозном режиме основывается на метеорологическом прогнозе на ближайшие 3 дня и текущей влажности почвы ($W_{факт}$), на основе полученных данных моделируется, когда в каждом элементарном участке поля влажность упадет до порога 70 % $HВ$, после чего рассчитывается поливная норма для каждой зоны.

Работа в фактическом режиме основывается на текущем уровне влажности $W_{факт}$, полученного с профилографов влажности на момент начала полива и на основе этих данных рассчитывает поливную норму для каждой зоны орошаемого поля. Результат работы фактического режима: карта пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля.

Дополнительные функции:

- Расчёт минимальной поливной нормы ($m_{мин}$) — количество воды, которое способна подать система равномерно по всей площади поля.
- Ограничение максимальной нормы ($m_{макс}$) — чтобы не было поверхностного стока (для уклонов снижается).
- Учёт эффективных осадков за последние сутки — вычитаются из потребности.

Результат работы модуля: Растровая карта пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля $m(x, y)$ в $м^3/га$, а также объём воды на каждую зону и на всё поле.

4. Модуль генерации карт предписаний и отчетов

Основная задача из результатов моделирования, сделать готовые карты-задания для дождевальной техники, сформировать отчеты для ответственного за проведение поливов.

Для дождевальной техники формируются:

- Карта-задания для дождевальной машины (файл Shapefile / GeoJSON с нормой на элементарный участок поля).
- Команды для VRI (Variable Rate Irrigation) — контроллеры Valley, Zimmatic.

Для ответственного за проведение поливов:

- Отчёт «Прогноз полива»: дата, суммарная потребность (m^3), экономия воды по сравнению с равномерным поливом (в %).
- Карты риска недополива/переувлажнения.
- Отчёт об эффективности полива — сравнение заданной $m(x,y)$ и фактической (если есть данные с расходомеров и датчиков).

Данная программа выступает ключевым инструментом для реализации потенциала цифрового двойника и закрывает главную потребность в условиях дефицита водных ресурсов и аридного климата Саратовского Заволжья- обеспечивать пространственное распределение поливных норм по площадям орошаемых полей, что является стратегией эффективного управления водными ресурсами.

Выводы по второй главе

1. Обоснована концепция программного и информационного обеспечения цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья, определены основные принципы на которых основывается цифровой двойник.

2. Создание цифровой карты орошаемого поля и атрибутивной базы данных информации цифрового двойника орошаемого поля, является основой для хранения данных и визуализации состояния почв опытного участка.

3. Разработанная структура цифрового двойника орошаемого поля, включает в себя технический блок, блок моделирования процессов, блок хранения данных и взаимодействия, обуславливает двусторонний непрерывный обмен данными между физическим объектом (орошаемым полем) и его цифровой моделью, что позволяет сделать вывод о том, что разработанная структура удовлетворяет требованиям к цифровому двойнику. Разработанная структура адаптирована к природно-климатическим, водно-физическим, агрохимическим условиям произрастания поливных культур на землях Саратовского Заволжья.

4. Созданная программа для оценки пространственного распределения состояния потенциального и эффективного плодородия почв орошаемого поля, является универсальным инструментом для мониторинга состояния поля, для оценки показателей его плодородия, для визуализации распределения и выделения зон с разным уровнем плодородия. Данная программа учитывает природно-климатические условия произрастания поливных культур на орошаемых землях Саратовского Заволжья. Ключевой особенностью является возможность выделения зон для дифференцированного внесения удобрений с учетом распределения содержания основных элементов питания по площади орошаемого поля.

5. Созданная программа для расчета пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля, является основой для оптимизации управления водными ресурсами. Программа является ядром для перехода к дифференцированному распределению оросительной воды, что позволяет разделять поле на элементарные участки с различной степенью потребности в поливе. Данная технология позволяет при назначении полива учитывать не только показатели влажности, а также основывать расчет на учете распределения показателей плодородия почв и данных вегетационных индексов, что позволяет получать оптимальные данные о состоянии почвы и возделываемых культур, для точного расчета поливной нормы для каждого элементарного участка поля.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА, УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа полевых и лабораторных исследований

Для достижения цели и задач исследования, необходимо проведение полевых и лабораторных исследований, для подтверждения теоретического обоснования разработанных компонентов цифрового двойника орошаемого поля.

Экспериментальная база исследования основывается на сборе необходимой информации об климатических и погодных условиях места проведения исследования, агрохимических, водно-физических характеристиках почв опытного участка, для эффективного функционирования ЦД, путем проведения полевых и лабораторных исследований.

Программа исследований включала в себя следующие задачи:

1. Провести оценку климатических условий места проведения исследований;
2. Провести оценку погодных условий полевого сезона места проведения исследований;
3. Изучить характеристику почв места проведения исследований;
4. Провести агрохимическое и агрофизическое обследование почв опытного участка;
5. Сделать соответствующие выводы по полученным результатам исследований.

3.2 Климатические условия места проведения исследований

Прибрежные районы Саратовского Заволжья представляют собой уникальный природный комплекс, включающий разнообразные ландшафты, плодородные земли и значительные водные ресурсы. Специфический климат,

рельеф местности и экосистема оказывают значительное влияние на организацию хозяйственной деятельности и качество жизни местного населения. Исследование особенностей климатических условий является важным этапом разработки стратегий устойчивого развития и рационального использования природных ресурсов. (Демакина И.И. и др., 2025 - 2026)

Опыт проводился на опытном поле Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова в УНПО «Поволжье» расположенного рядом с селом Степное Энгельсского района Саратовской области в 2023-2025 годах. (рисунок 3.1)



Рисунок 3.1 – Место проведения исследований

УНПО «Поволжье» располагается в сухостепной зоне Саратовского Левобережья, провинции низменно-равнинного степного Сыртового Заволжья (рисунок 3.2).

Место проведения исследований располагается рядом с селом Степное в южной части Энгельсского района Саратовской области который относится к VI Центральной левобережной сельскохозяйственной микроне. (рисунок 3.3)

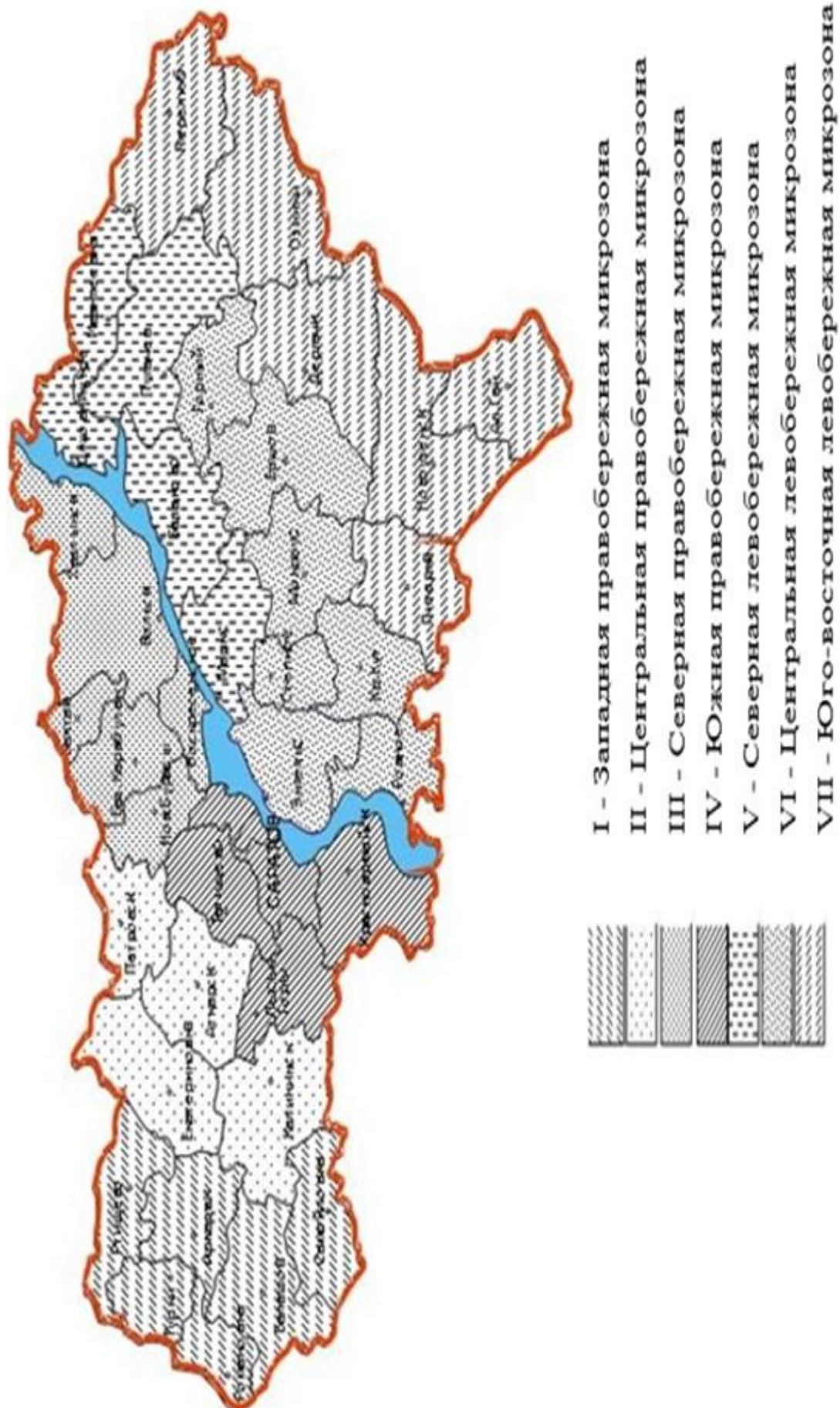


Рисунок 3.3 - Сельскохозяйственные микрозоны Саратовской области

Рассматриваемая территория относится к зоне аридного климата, что связано с сокращением осадков на 0,3-0,5 мм в год. Гидротермический коэффициент (ГТК) равен 0,6–0,7. За год выпадает 350–370 мм осадков, из них за поливной сезон 110–150 мм. (рисунок 3.4)

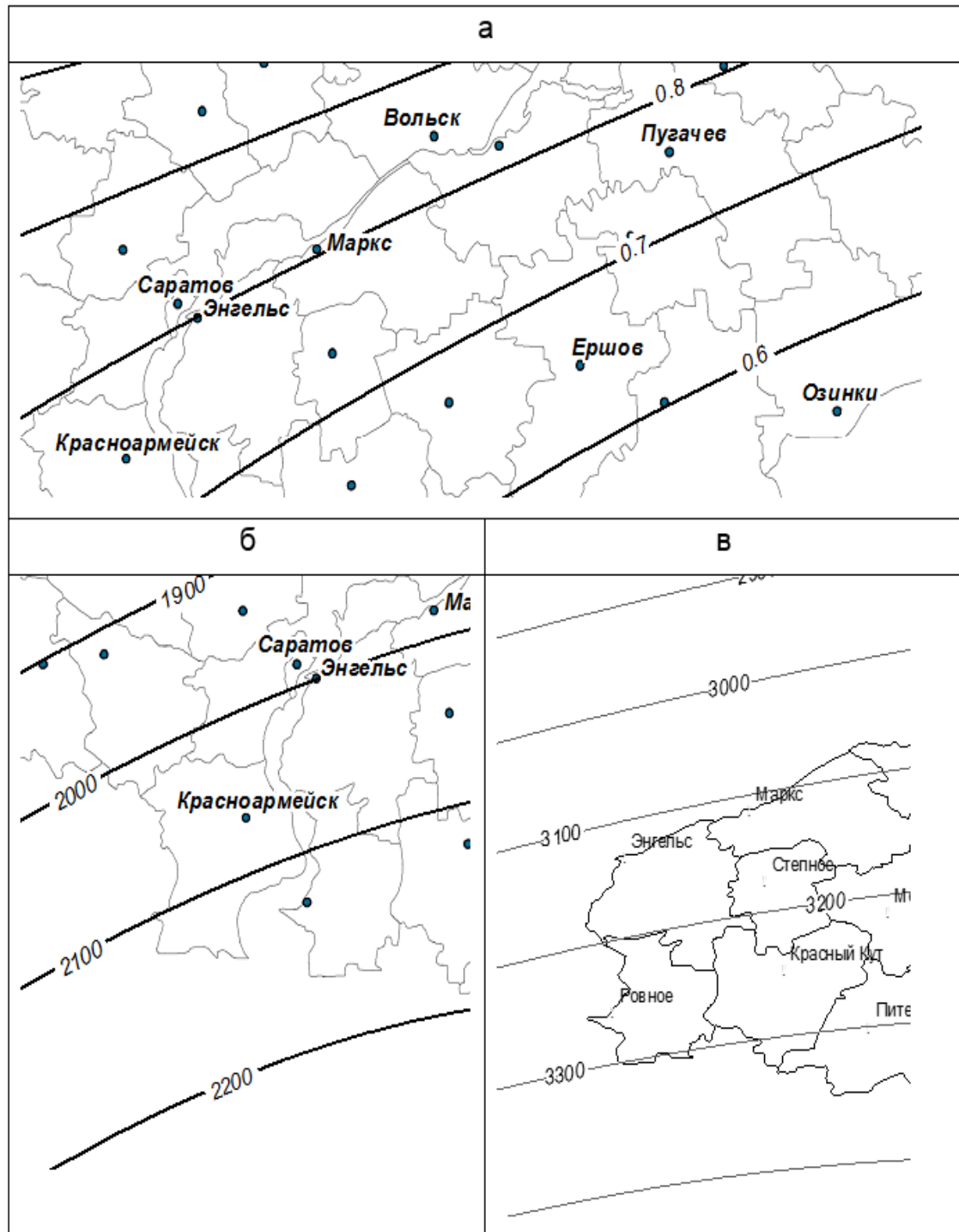


Рисунок 3.4 – Гидротермические коэффициенты (а), суммы дефицитов влажности воздуха (б) и суммы эффективных температур теплого времени года

Запасы воды в снежном покрове варьируются в диапазоне 500-700 м³/га. Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы к началу поливного сезона составляют 105–130 мм.

Начало поливного сезона характеризуется быстрым нарастанием температуры. Продолжительность безморозного периода варьируется в диапазоне 137-190 дней. Средняя температура воздуха за период проведения поливов с мая по август равняется 20,1°C. Сумма температур воздуха выше 10°C варьируется от 2800 до 2950°C.

На основе данных последних исследований метеорологических условий места проведения исследования, делаем вывод что среднегодовая температура воздуха увеличивается на 0,04°C в год, влагообеспеченность почв Саратовского Заволжья уменьшается на 25-35%. (Переведенцев Ю.П., 2010, Левицкая Н.Г., 2019)

3.3 Погодные условия поливного сезона места проведения исследований

Поливной сезон 2023 года характеризуется как достаточно благоприятный и теплый в температурном отношении (сумма активных температур 2446°C), неравномерное распределение осадков – засушливый май, переувлажнение в июне, и особенно в июле (75,2 мм осадков, более 300% от нормы), сумма осадков (157,7 мм – близкая к среднегодовой), повышенная влажность в июле (64%), в августе падает до 47-50% в 1-2 декады, ГТК = 0,64 по шкале Селянинова характеризуется как «сухой» (0,5-0,7). (таблица 3.1)

Нормированные показатели погодных условий определялись на основе показаний метеостанций «Ершов» (координаты места расположения: широта - 51.3429°, долгота - 48.3081°) и «Энгельс» (координаты места расположения: широта – 51.4803°, долгота - 46.1700°)

Таблица 3.1 - Погодные условия поливного сезона по данным метеостанции
Сокол-М № 159, с. Степное за 2023 год

Месяцы	Декады	Температура воздуха в °С			Сумма осадков в мм			Относительная влажность воздуха в %	
		факт	норма	отклонение от нормы	факт	норма	% от нормы	факт	норма
Май	1	12,8	16,3	-3,5	1,1	10,8	10	55,2	67,8
	2	14,5	14,7	-0,2	20,7	3,8	541	61,7	75,1
	3	20	18	2	3,2	5,1	63	60,9	71,4
месяц		15,8	16,3	-0,5	25	19,7	127	59,3	71,4
Июнь	1	18,7	20,5	-1,8	0,1	3,5	3	56,3	72,4
	2	18,9	22,1	-3,2	0,4	7,2	6	54,6	71
	3	16,9	21,7	-4,8	28	14,5	194	68	73,5
месяц		18,2	21,4	-3,2	28,5	25,1	113	59,6	72,3
Июль	1	22,5	26,3	-3,8	8	2,8	283	68	57,9
	2	20	23,6	-3,6	54,1	6,5	828	66,9	72,6
	3	22,8	23,4	-0,6	13,1	6,4	205	57,5	64,3
месяц		21,8	24,5	-2,7	75,2	15,8	477	64,1	64,9
Август	1	27	22,9	4,1	0,2	6,6	3	50	76,5
	2	26,7	21	5,7	0	3,9	0	47,4	72
	3	17,7	20,9	-3,2	28,8	3,4	840	59,3	70,1
месяц		23,8	21,6	2,2	29	13,9	208	52,2	72,9
За сезон		19,9	20,95	-1.05	157,7	74,5	212	58,8	70,38

Поливной сезон 2024 года имел большую вариативность метеорологических данных – резкое похолодание в конце мая, ярко выраженный дефицит осадков в июле – августе.

Первая половина мая аномально холодная (отклонение от нормы до - 7,4°C), осадки составили 5% от нормы, вторая декада месяца резкое переувлажнение (осадки превысили норму в 2,4 раза). Относительная влажность воздуха ниже нормы на 20-30%, что неблагоприятно сказывалось для начальных стадий вегетации поливных культур.

В июне был устойчивый температурный режим с превышением нормы на 3,1-3,6°C. Влажность воздуха осталась пониженная на 13-15 % ниже нормы, что компенсировалось превышением осадков в 1,6-2,7 раза и способствовало накоплению продуктивной влаги в почвах. Июнь был благоприятным для активного развития культур, с риском переувлажнения в отдельные периоды.

В первой декаде июля температурный режим был ниже среднегодовой нормы на 1,9°C, дефицит осадков 41% от нормы, вторая декада выше нормы на 1,6°C с нормальным количеством осадков 106 % от нормы. Влажность воздуха продолжала оставаться ниже нормы на 15 -16%.

Август 2024 года выдался жарким с превышением нормы на 1,1°C, катастрофический дефицит осадков – отсутствие осадков в первой половине месяца и лишь 18 % от нормы в конце. (таблица 3.2)

Таблица 3.2 - Погодные условия поливного сезона по данным метеостанции Сокол-М № 159, с. Степное за 2024 год

Месяцы	Декады	Температура воздуха в °C			Сумма осадков в мм			Относительная влажность воздуха в %	
		факт	норма	отклонение от нормы	факт	норма	% от нормы	факт	норма
Май	1	8,9	16,3	-7,4	0,5	10,8	5	42,6	67,8
	2	10,6	14,7	-4,1	9,23	3,8	241	46	75,1
	3	16,5	18	-1,6	5,52	5,1	109	38,09	71,4
месяц		12	16,3	-4,4	15,3	19,7	77	42,2	71,4
Июнь	1	23,55	20,5	3,1	9,3	3,5	268	57	72,4
	2	25,67	22,1	3,6	11,4	7,2	159	57,7	71
Июнь	3	19,8	21,7	-1,9	5,9	14,5	41	58,05	73,5
месяц		23	21,4	1,6	26,6	25,1	106	57,6	72,3
Июль	1	27,4	26,3	1,1	0	2,8	0	59	57,9
	2	24,7	23,6	1,1	1,2	6,5	18	46	72,6
	3	22,24	23,4	-1,2	5,6	6,4	88	54,6	64,3
месяц		24,8	24,5	0,3	6,8	15,8	43	53,2	64,9
Август	1	21,9	22,9	-1	0,2	6,6	3	64,5	76,5
	2	20,3	21	-0,7	2,9	3,9	75	60,4	72
	3	22,16	20,9	1,3	0,8	3,4	23	50	70,1
месяц		21,5	21,6	-0,2	3,9	13,9	28	58,3	72,9
За сезон		20,3	20,95	-0,65	52,6	74,5	71	52,8	70,38

Температурный режим поливного сезона 2025 года имеет следующие значения: умеренно теплый май (16°C средняя температура), повышение температуры воздуха к июлю (23,8°C), снижение в августе (21,3°C), сумма активных температур 2468°C. Поливной сезон 2025 года характеризуется сухим – неравномерные и небольшие (57,7 мм за сезон), лишь в июне осадки были выше нормы. Влажность воздуха: в мае низкая (50,7%), в июне выше

нормы (67,7%), в июле и августе около 60%. ГТК = 0,23, сильная засуха, характерная для полупустынной зоны. (таблица 3.3)

Таблица 3.3 - Погодные условия поливного сезона по данным метеостанции Сокол-М № 159, с. Степное за 2025 год

Месяцы	Декады	Температура воздуха в °C			Сумма осадков в мм			Относительная влажность воздуха в %	
		факт	норма	отклонение от нормы	факт	норма	% от нормы	факт	норма
Май	1	14	16,3	-2,3	2,6	10,8	24,1	53,3	67,8
	2	14	14,7	-0,7	9,4	3,8	247,4	55,5	75,1
	3	20,1	18	2,1	0	5,1	0	43,2	71,4
месяц		16	16,3	-0,3	12	19,7	60,9	50,7	71,4
Июнь	1	21,1	20,5	0,6	4,8	3,5	137,1	57,1	72,4
	2	19,7	22,1	-2,4	9,4	7,2	130,6	65	71
	3	16,2	21,7	-5,5	13,4	14,5	92,4	81	73,5
месяц		19	21,4	-2,4	27,6	25,1	110	67,7	72,3
Июль	1	22	26,3	-4,3	0,2	2,8	7,1	59	57,9
	2	26	23,6	2,4	0,3	6,5	4,6	58	72,6
	3	23,5	23,4	0,1	6,9	6,4	107,8	62	64,3
месяц		23,8	24,5	-0,7	7,4	15,8	46,8	59,7	64,9
Август	1	24,5	22,9	1,6	4,7	6,6	71,2	56,2	76,5
	2	19,7	21	-0,3	3,3	3,9	84,6	67,6	72
	3	19,8	20,9	-1,1	2,7	3,4	79,4	56	70,1
месяц		21,3	21,6	-0,3	10,7	13,9	77	59,9	72,9
За сезон		20	20,95	-0,95	57,7	74,5	77	59,5	70,38

Основываясь на полученных данных за три года проведения исследований, можно сделать вывод о том, что погодные условия имеют сильную изменчивость, неравномерное распределение осадков и как следствие засуху. ГТК варьировался от 0,21-0,23 (сильно засушливый) до 0,64 (умеренно-влажного). (Демакина И.И. и др., 2026)

3.4 Характеристика почв места проведения исследований

Обоснование целесообразности применения прецизионных методов земледелия, а именно внедрение технологий цифровых двойников, всегда должно осуществляться только во взаимодействии с расширенной информацией о почвенных характеристиках. При анализе почвенного

плодородия необходимо представить комплекс характеристик почвенного покрова, на котором проводились исследования. Показатели почвенного плодородия во многом определяют эффективность проводимых технологических приемов при возделывании поливных культур.

Почвенный покров орошаемых земель Саратовского Заволжья представлен преимущественно каштановыми почвами различных подтипов, а также лугово-каштановыми почвами и комплексами с солонцами, так в рамках даже одного орошаемого массива вариабельность почвенных разностей очень высокая (таблица 3.4). (Шадских В.А. и др., 2020-2022, Пронько Н.А. и др., 2026)

Таблица 3.4 - Характеристика основных типов почв Саратовского Заволжья

Показатель	Черноземы южные	Темно-каштановые	Светло-каштановые
Мощность гумусового горизонта (A+B), см	50-70	40-50	30-40
Содержание гумуса в слое 0-30 см, %	4,5-6,0	3,0-4,5	2,0-2,5
Гранулометрический состав	Тяжело-суглинистый	Тяжело-суглинистый, глинистый	Средне-суглинистый
Содержание физической глины (<0,01 мм), %	45-55	50-60	40-50
Плотность сложения, г/см ³	1,15-1,25	1,20-1,30	1,25-1,35
Наименьшая влагоемкость (НВ), % от массы	28-32	25-28	20-24
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,4-0,8	0,2-0,5	0,3-0,6

Рельеф представляет собой пологоволнистую равнину, осложнённую многочисленными речными долинами, балками, ложбинами. Отметки поверхности земли волнисто-увалистой сыртовой равнины изменяются в пределах 70-155 м.

Почвообразующие породы – делювиальные суглинки и сыртовые глины, которые иногда засолены хлоридами и сульфатами. Почвенный покров представлен темно-каштановыми почвами с разной степенью солонцеватости и пятнами солонцов. Плотность почвы увеличивается вниз

по профилю от 1,19 до 1,63 г/см³, а пористость их уменьшается от 52,9 до 37,4 - 46,1%, что ухудшает водные свойства. (Усов Н.И., 1948)

Почвы опытного участка темно-каштановые, гранулометрический состав - среднесуглинистые на массовом суглинке. Их характерными признаками являются малая гумусность, содержание органического вещества варьируется от 2,2-2,8. Сильная дифференциация почвенного профиля, низкая выраженность карбонатных горизонтов. (Янюк В.М., 2021, Корсак В.В. и др., 2021)

3.5 Методики проведения лабораторных и полевых исследований

Для решения поставленных задач и достижения цели исследования, по повышению эффективности использования мелиорируемых земель Саратовского Заволжья, путем разработки цифрового двойника орошаемого поля, был заложен полевой опыт. Полевой опыт проводился в соответствии с общепринятыми методиками (Качинский Н.А., 1970, Доспехов Б.А., 1985).

Основой опыта является сбор необходимой информации об климатических и погодных условиях места проведения исследования, агрохимических, водно-физических характеристиках почв опытного участка, для эффективного функционирования ЦД, путем проведения полевых и лабораторных исследований, установкой на опытном поле lot-устройств (датчики влажности и температуры почв) (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Датчики влажности и температуры почв фирмы Kaipos на орошаемом поле УНПО «Поволжье»

Профилографы фирмы Kaipos предназначены для автоматического измерения и мониторинга температуры и влажности почвы, количества осадков. Конструктивно профилографы построены по блочному принципу, состоят из основного блока, солнечной панели, блока датчиков. Основной блок включает в себя контроллеры со встроенным микропроцессором, модуль передачи данных, линии связи и вспомогательное оборудование. Принцип действия основан на измерении параметров первичными измерительными преобразователями (датчиками) с последующим преобразованием в цифровой код и выдачей результатов измерений на устройстве отображения. Профилографы оснащены следующим измерительным оборудованием:

1. Датчики влажности и температуры почвы, модель 100 STM – принцип действия датчиков основан на емкостном методе измерения относительной диэлектрической проницаемости почвы.

2. Датчик осадков, модель КаіроRG – принцип действия основан на регистрации количества электрических импульсов в зависимости от опрокидываний челночного механизма.

Датчики влажности и температуры почвы установлены послойно на 4 глубинах 0,1 м, 0,3 м, 0,5 м и 0,7 м.

В процессе исследования велись следующие наблюдения за:

Влажностью почвы (перед началом полевого сезона, перед проведением поливов, после проведения поливов, в конце поливного сезона) определяли полевым, термостатно-весовым методом с отбором проб почвенным буром АМ-16. Образцы почвы для определения влажности отбирались послойно через каждые 0,1 м из трёх точек, расположенных по вершинам треугольника на расстоянии 1 м, посередине делянки. Отбор образцов проводили через 0,1 м на глубину 1 м. (ГОСТ 28268-89 Почвы). Влажность почвы так же определялась с помощью установленных профилографов фирмы Каірос, послойно с глубин 0,1 м, 0,3 м, 0,5 м и 0,7 м.

Плотностью почвы (метод Н.А. Качинского), почвенные образцыобирались в полевых условиях без нарушения сложения почвы режущим кольцом, послойно через каждые 0,1 м до 0,4 м. (ГОСТ 5180-2015 Грунты).

Агрохимической составляющей основных элементов питания:

- содержанием гумуса (методика по Тюрину, (ГОСТ 26213–2021. Почвы, 2021)
- содержанием доступного фосфора (методика по Мачигину,)
- содержанием обменного калия (методика по Мачигину, ГОСТ 26205–91. Почвы, 1993)

Путем отбора проб почвенным буром АМ-16. Образцы почвы отбирались послойно – через каждые 0,1 м до глубины 0,3 м из трех точек.

Температурой почв, определялась путем мониторинга данных полученных с установленных на орошаемом участке профилографов фирмы Каірос, данные получали с 4 слоев почвы, глубиной 0,1 м, 0,3 м, 0,5 м и 0,7 м.

Погодными данными, определялись (температура воздуха, осадки, относительная влажность воздуха) используя показания метеостанции Сокол-М установленной на орошаемом поле места проведения исследований. Станция метеорологическая Сокол-М предназначена для автоматических измерений метеорологических параметров: температуры воздуха, относительной влажности воздуха, количества атмосферных осадков. Принцип действия метеостанции основан на измерении первичными измерительными преобразователями (датчиками) физических величин с передачей данных в контроллер и далее пользователям с помощью средств связи.

Принцип действия датчиков для различных измерительных каналов основан на:

- при измерении температуры воздуха, на изменении падения напряжения на р-п переходе в зависимости от температуры окружающей среды;
- при измерении относительной влажности воздуха, на изменении емкости полимерного конденсатора в зависимости от относительной влажности воздуха;
- при измерении количества атмосферных осадков, на регистрации числа опрокидываний лоточного механизма с помощью герконового выключателя.

Количеством подаваемой оросительной воды, определялось путем мониторинга данных полученных с установленных на орошаемом участке профилографов фирмы Kaipos оборудованными осадкомером.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа с использованием компьютера по Доспехову Б. А. (1985).

Выводы по третьей главе

1. Место проведения исследования входит в зону аридного климата, где при постоянной засухе и ливневом характере осадков, орошение является

необходимым условием для ведения рационального сельского хозяйства и стабильных урожаев.

2. Опытный участок орошаемого поля УНПО «Поволжье» расположен рядом с селом Степное Энгельсского района Саратовской области, почвы опытного участка темно-каштановые, водно-физические характеристики имеют большую вариабельность показателей, что еще раз доказывает необходимость применения прецизионных методов земледелия.

3. Погодные условия за годы проведения исследования, наглядно показывают нехватку естественных осадков и засуху, так же на основе метеорологических данных, делаем вывод, о том, что необходимо учитывать их для моделирования процессов и принятия решений при назначении агротехнических мероприятий (проведение поливов).

4. Методика проведения полевых и лабораторных исследований основывается на общепринятых методиках, и включает все необходимые опыты для получения оптимальной информации для целей исследования.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, АЛГОРИТМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОРОШАЕМОГО ПОЛЯ

4.1 Результаты полевых и лабораторных исследований почв опытного участка

Результаты полевых испытаний подтвердили высокую степень пространственной неоднородности почвенных свойств орошаемого поля. Наименьшая влагоёмкость в корнеобитаемом слое варьировала от 22,1 до 29,9 % массы, плотность сложения почвы от 1,21 до 1,44 г/см³. На основе полученных данных, делаем вывод о том, что традиционные методы расчета средних поливных норм на поле, являются неэффективными.

Результаты агрохимических (гумус, основные элементы питания) анализов показывают, что средние значения основных показателей плодородия находятся в пределах, благоприятных для возделывания сельскохозяйственных культур. Однако диапазоны измеряемых параметров показывают значительную пространственную неоднородность условий произрастания поливных культур: гумус варьировал от 2,2 до 2,8 %, фосфор – от 2,9 до 3,64 мг/100 г, калий – от 14,5 до 16,2 мг/100 г.

Результаты агрохимического обследования почв опытного участка на содержание гумуса и основных элементов питания за годы проведения исследований представлены на рисунках 4.1 - 4.5.

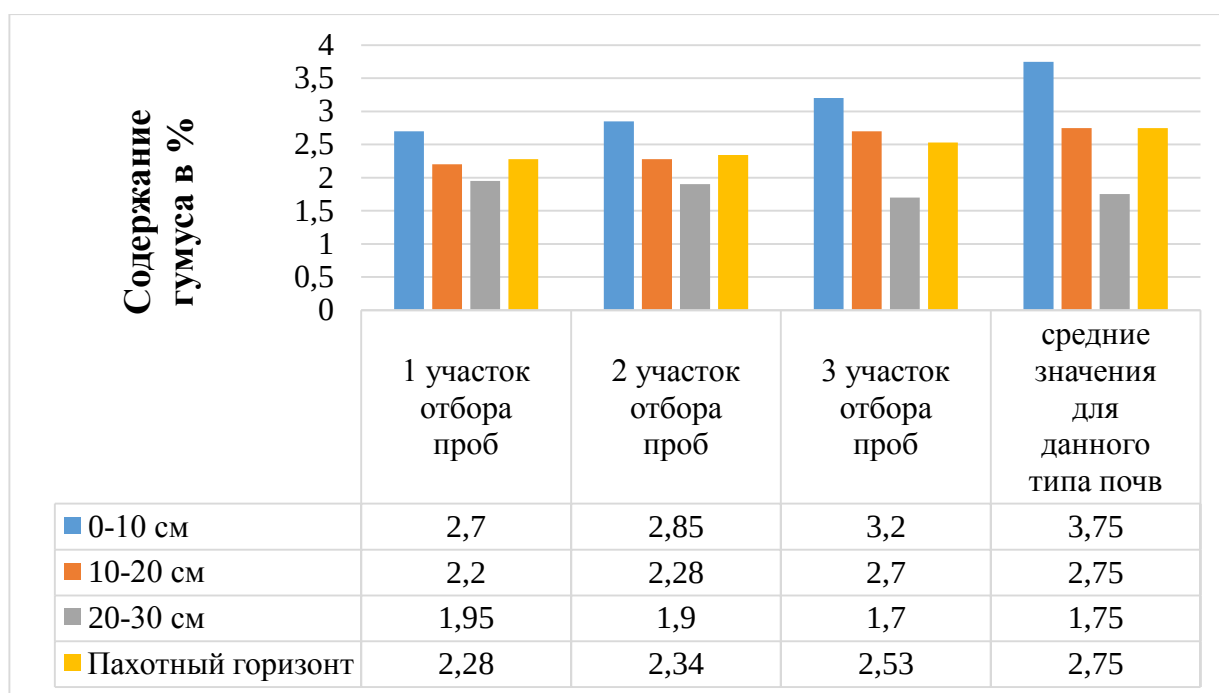


Рисунок 4.1 - Результаты агрохимического обследования опытного участка орошаемого поля УНПО «Поволжье» на содержание гумуса за 2023 год

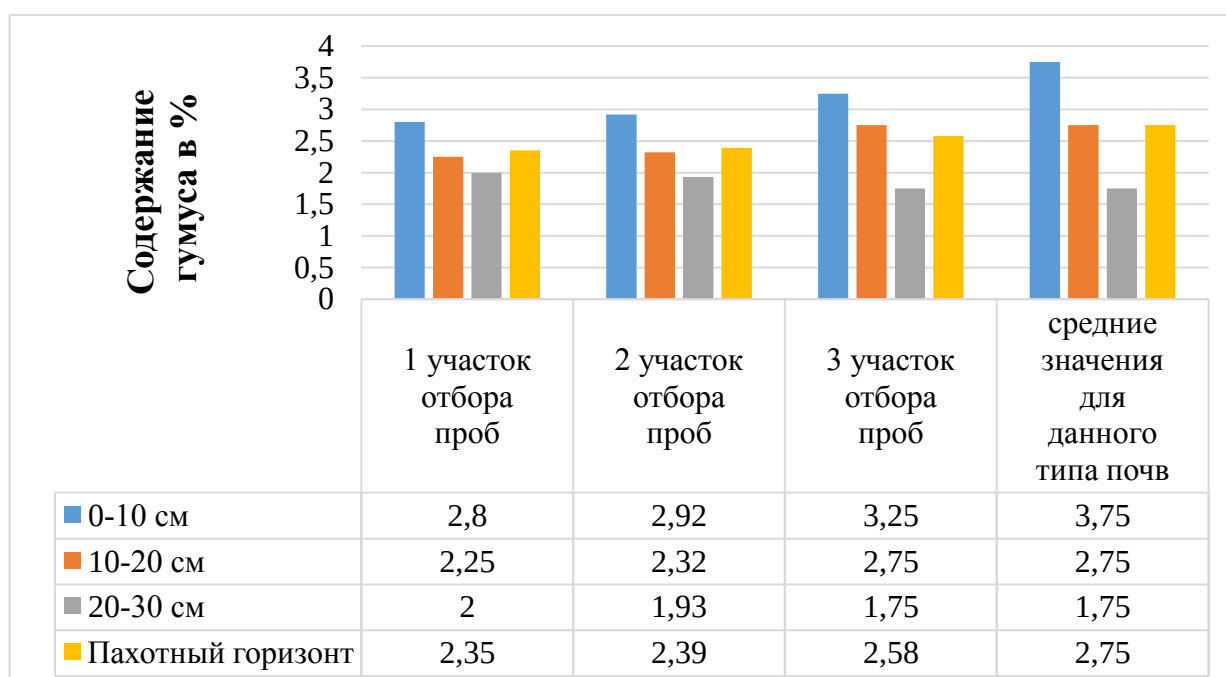


Рисунок 4.2 - Результаты агрохимического обследования опытного участка орошаемого поля УНПО «Поволжье» на содержание гумуса за 2024 год

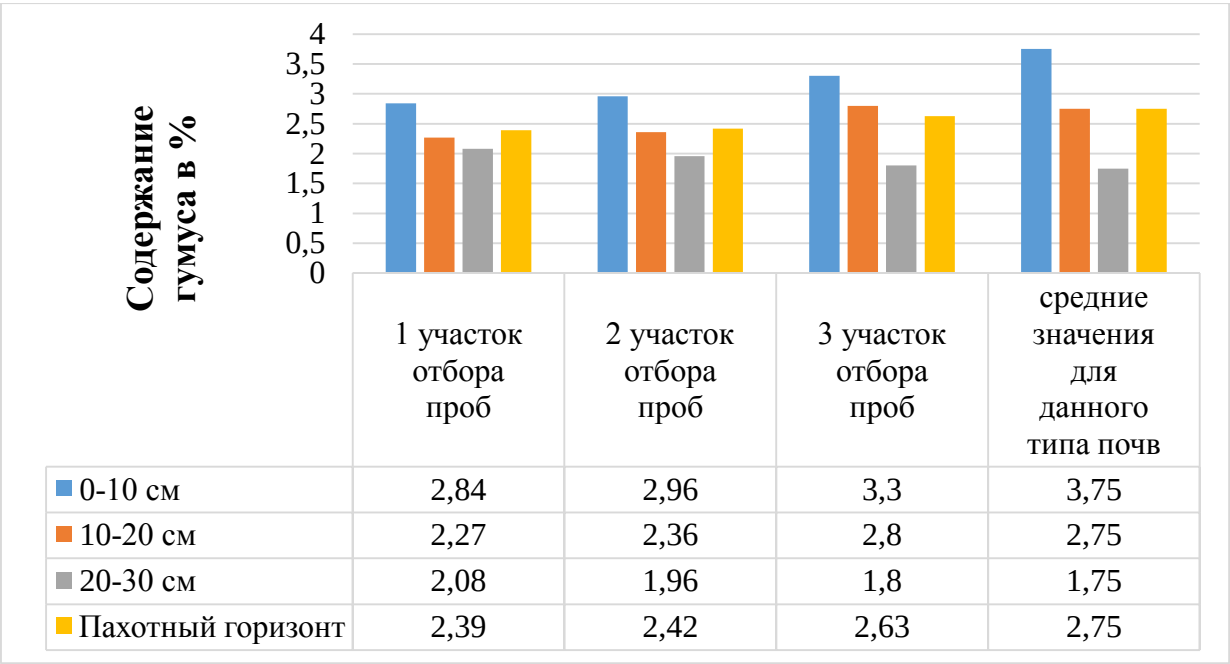


Рисунок 4.3 - Результаты агрохимического обследования опытного участка орошаемого поля УНПО «Поволжье» на содержание гумуса за 2025 год

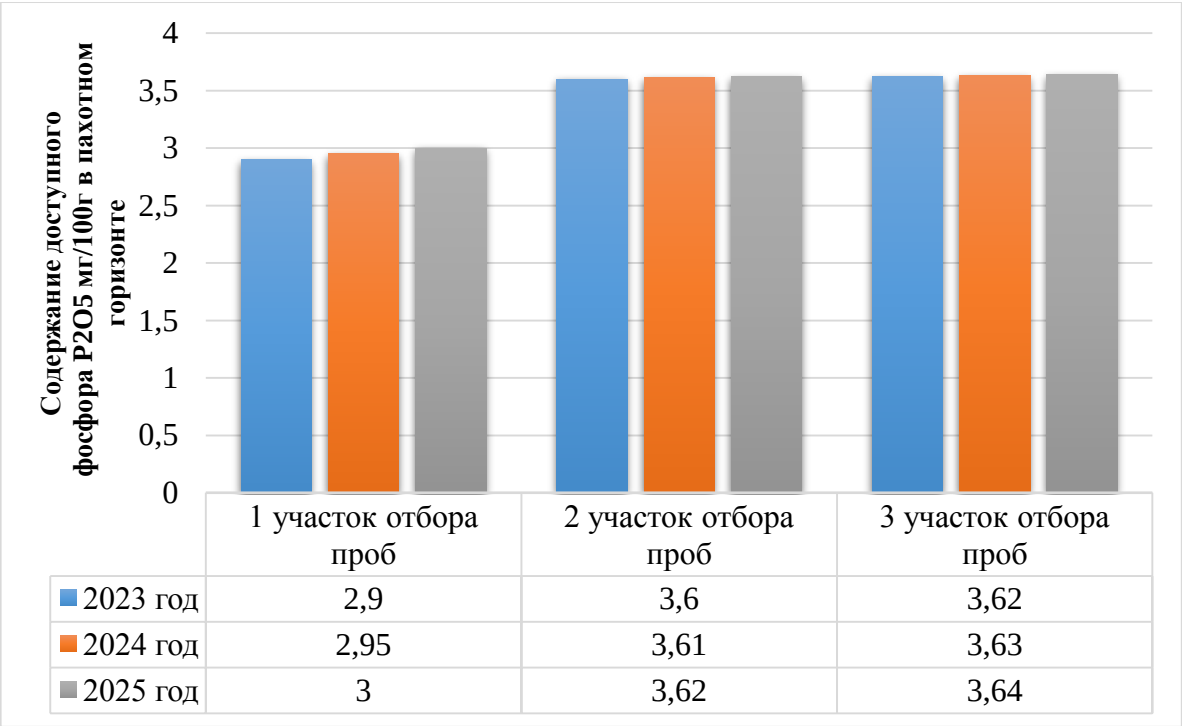


Рисунок 4.4 – Результаты агрохимического обследования опытного участка орошаемого поля УНПО «Поволжье» на содержание доступного фосфора за 2023 - 2025 годы

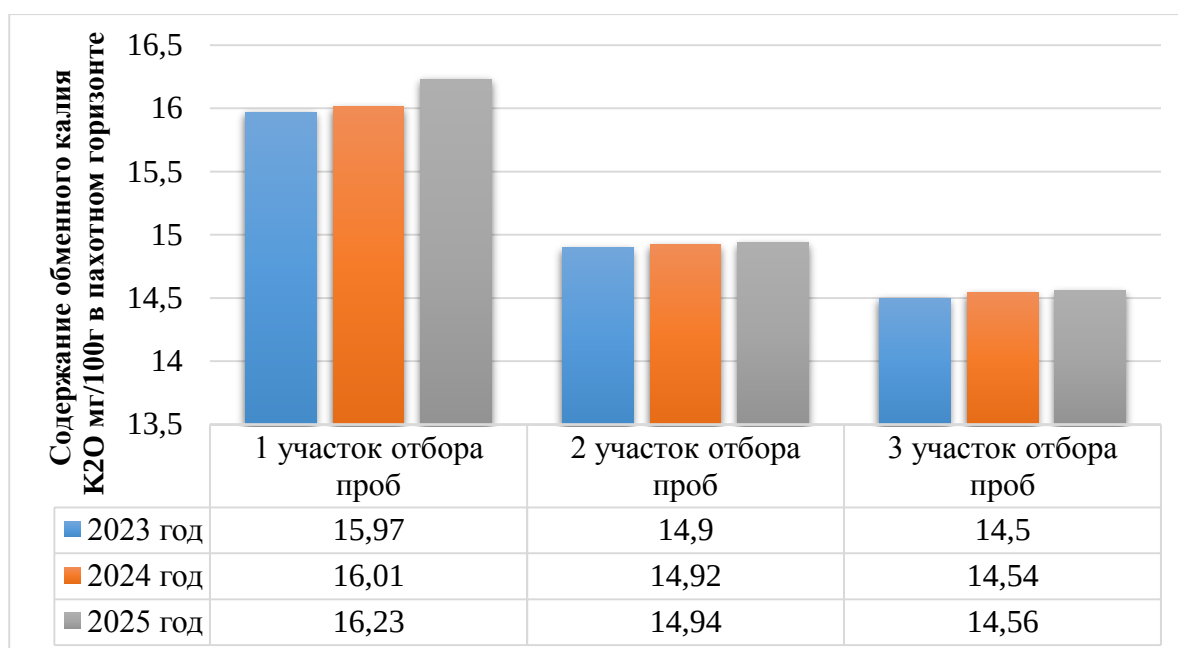


Рисунок 4.5 – Результаты агрохимического обследования опытного участка орошаемого поля УНПО «Поволжье» на содержание обменного калия за 2023 -2025 годы

Результаты агрофизических (гранулометрический состав, плотность сложения твердой фазы, наименьшая влагоемкость, влажность завядания) анализов подтверждают пространственную неоднородность условий произрастания возделываемых культур. Анализ результатов агрофизического обследования почв опытного участка орошаемого поля показал существенное влияние плотности сложения почв на ее водоудерживающую способность (рисунок 4.6).

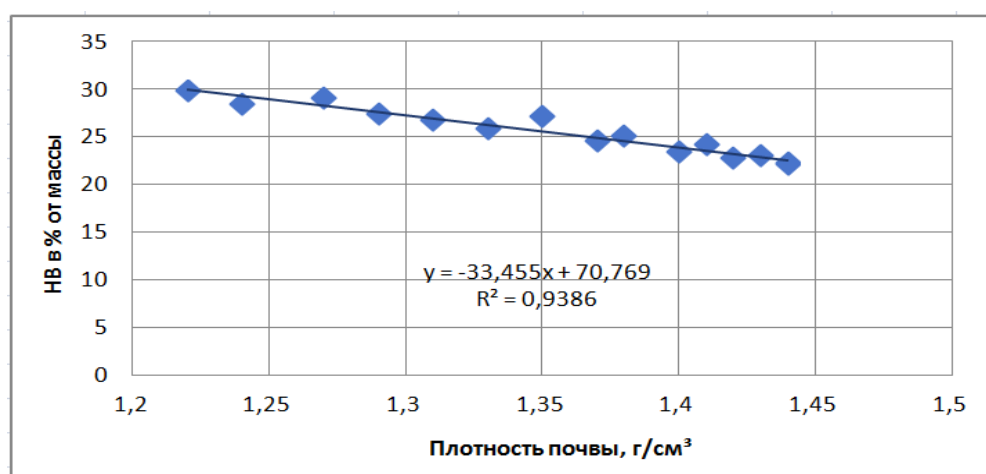


Рисунок 4.6 - Зависимость НВ от плотности почвы в слое 0 - 40 см опытного участка орошаемого поля

Результаты агрофизических анализов почв опытного участка сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Вариация водно-физических свойств почв опытного участка орошаемого поля УНПО «Поволжье»

Показатель	Диапазон варьирования	Среднее значение	Коэффициент вариации в %
Плотность сложения г/см ³	1,21-1,44	1,32	6
НВ % массы	22,1-29,9	26	12
ВЗ % массы	9,1-12,0	10,6	12

Полученные данные подтверждают необходимость перехода к дифференцированному управлению водными ресурсам и элементами минерального питания на основе технологий ЦД, способного учитывать внутриполевую пестроту почвенного плодородия.

Исходя из выше изложенного и табличных данных, взятых на основании агрохимического и водно-физического анализов опытного участка, можно сделать вывод о том, что темно-каштановая почва имеет благоприятные условия для возделывания сельскохозяйственных культур, а большая вариабельность почвенных характеристик, подтверждает необходимость применения прецизионных методов земледелия, путем разработки цифрового двойника орошаемого поля.

Данные по влагообеспеченности, полученные с профилографов влажности и температуры почвы, установленных на опытном участке орошаемого поля, представлены на рисунках 4.7 – 4.9.

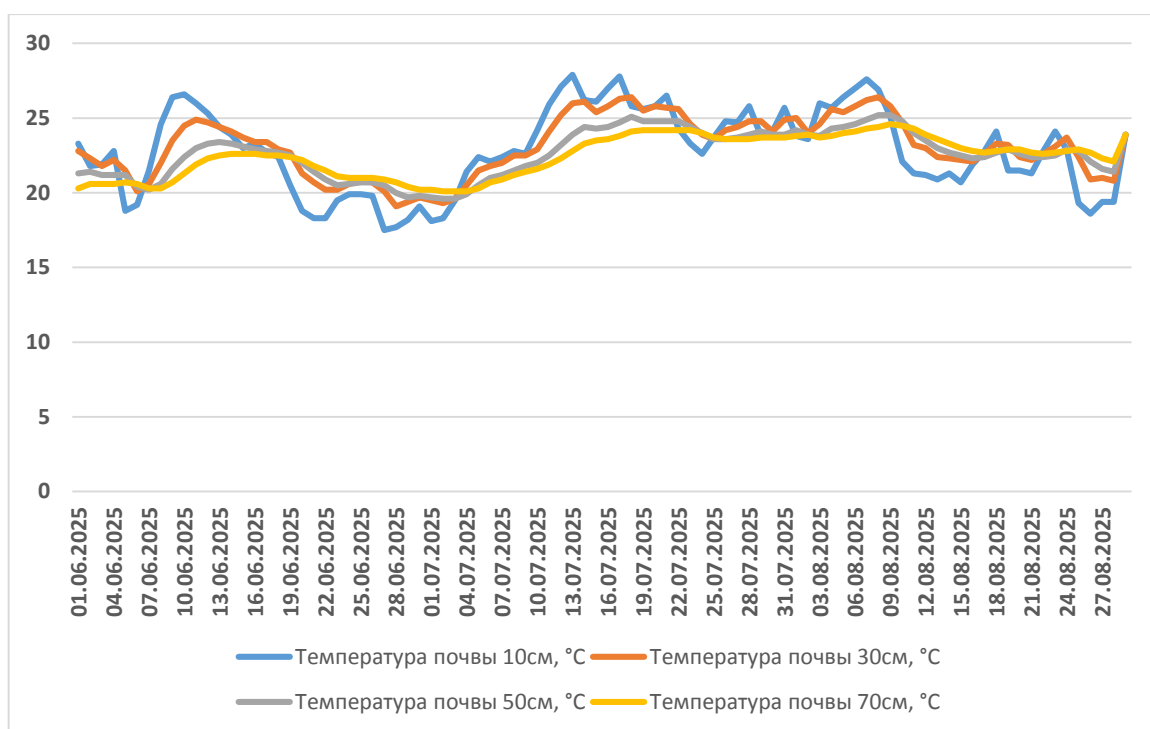


Рисунок 4.7 – Данные о температуре почв орошаемого участка УНПО «Поволжье» за период орошения 2025 год (1участок поля)

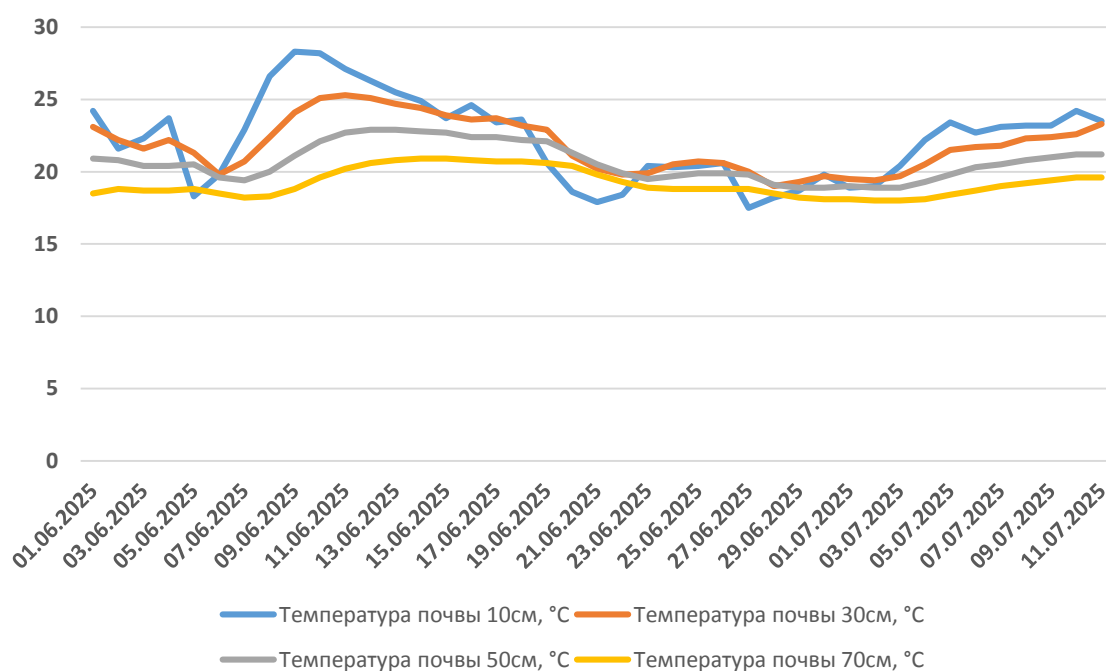


Рисунок 4.8 – Данные о температуре почв орошаемого участка УНПО «Поволжье» за период орошения 2025 год (2 участок поля)

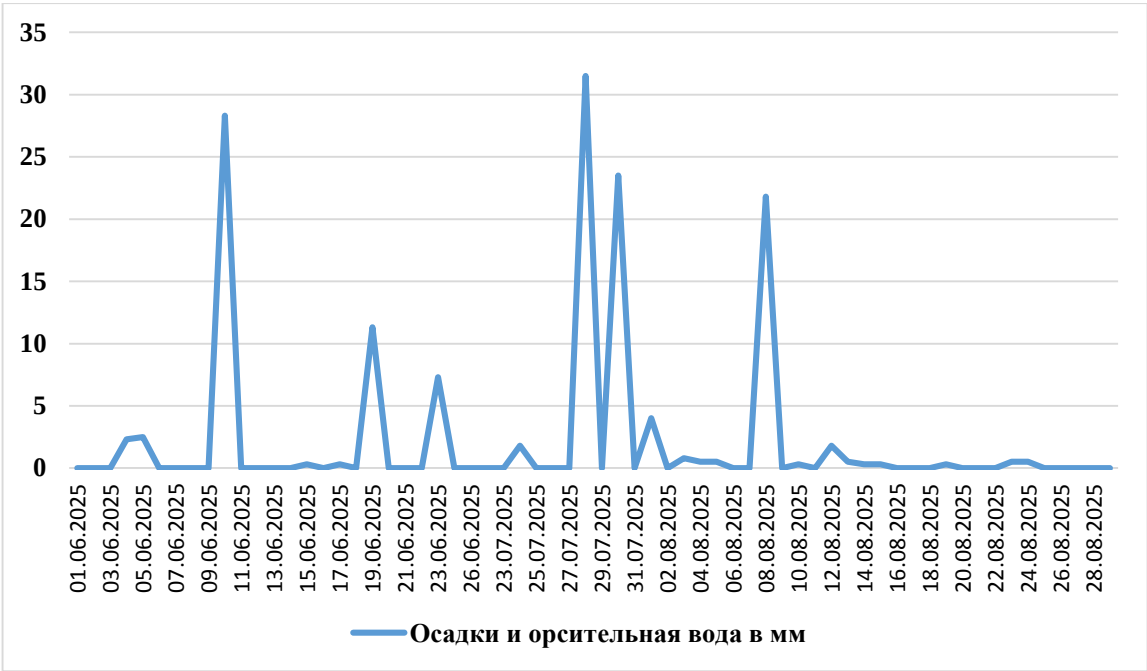


Рисунок 4.9 - Количество осадков и оросительной воды по показаниям профилографов за поливной сезон УНПО Поволжье 2025 год

4.2 Цифровая карта цифрового двойника орошаемого поля

Основной задачей при создании цифровой карты орошаемого поля является определение ключевых групп слоев, необходимых для корректного получения данных и объективного анализа. Состав разработанной, цифровой карты для орошаемого поля состоит из следующих групп слоев, которые различаются по частоте обновления (таблицы 4.2 – 4.5).

Таблица 4.2 – Статистические слои цифровой карты орошаемого поля

Слой	Тип данных	Описание и назначение
Границы поля	Вектор (Полигон)	Точные географические границы поля. Используется для расчета площади и ограничения всех операций. (рисунок 4.10)
Топография (DEM/DTM)	Растр (ЦМР)	Высота, уклон и экспозиция. Критически важен для моделирования стока воды, планирования дренажа и оптимизации полива. (рисунок 4.11)
Инфраструктура	Вектор (Линии, точки)	Постоянные объекты: дороги, лесополосы, главные водоводы, дренажные каналы.



Рисунок 4.10 – Цифровая карта расположения опытного участка УНПО «Поволжье»

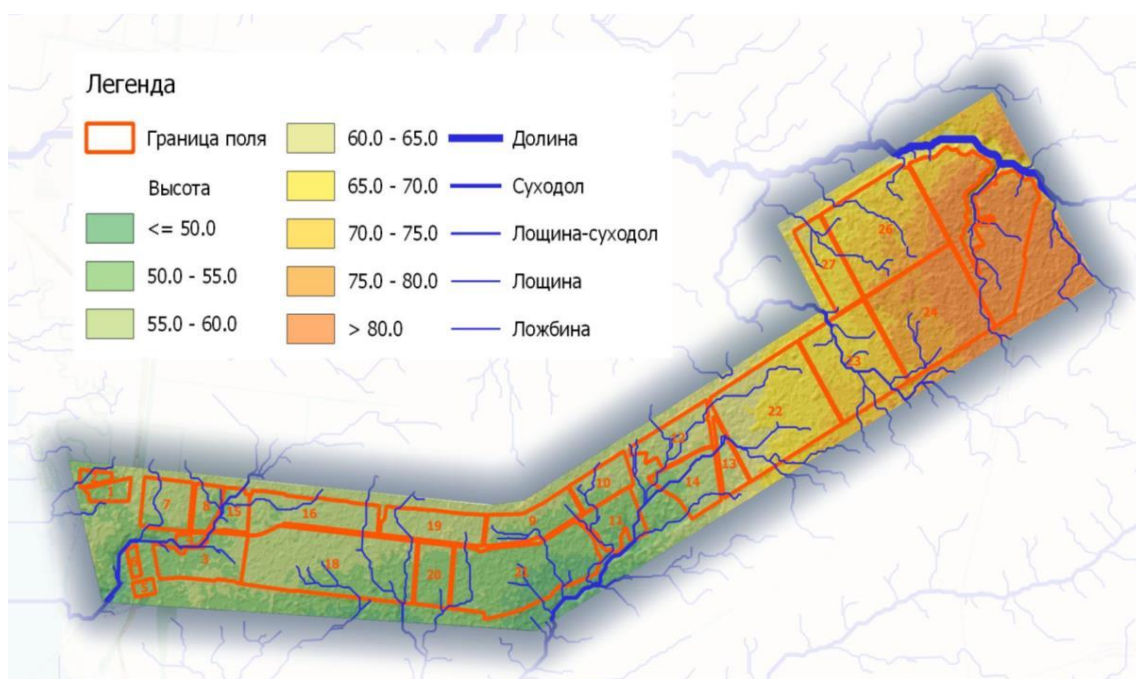


Рисунок 4.11 - Цифровая модель рельефа с генерализованной гидрографической сетью территории УНПО «Поволжье»

Таблица 4.3 – Полустатистические слои цифровой карты орошаемого поля

Слой	Тип данных	Описание и назначение
Типы почв	Вектор/растр	Классификация почв по текстуре, генезису и механическому составу.
Карты свойств почвы	Растр	Пространственное распределение ключевых параметров: кислотность pH, органическое вещество, содержание основных элементов питания (N, P, K).
Зоны управления	Вектор (Полигон)	Зонирование поля на основе однородности почвы, рельефа или исторической урожайности. Используется для дифференцированного внесения удобрений и воды (VRA).

Таблица 4.4 – Динамические слои цифровой карты орошаемого поля

Слой	Тип данных	Описание и назначение
Индексы растительности	Растр (GeoTIFF)	Получены со спутников или БПЛА. NDVI, NDRE (содержание азота), EVI (плотность растительности)
Карты влажности почвы	Растр	Пространственное распределение текущей влажности почвы, интерполированное из показаний датчиков или данных дистанционного зондирования, данных полевых исследований.
Тепловые карты	Растр (GeoTIFF)	Температура поверхности поля. Используется для выявления зон водного стресса (более горячие участки).
Фенологические карты	Растр/вектор	Пространственное распределение текущей фазы развития культуры (например, цветение, созревание).

Таблица 4.5 – Операционные и исторические слои цифровой карты орошаемого поля

Слой	Тип данных	Описание и назначение
Система орошения	Вектор (Линии, точки)	Точное расположение поливных систем (трубопроводы, форсунки, клапаны, насосы).
Датчики и IoT	Вектор (точки)	Географическое расположение всех стационарных датчиков (погодные станции, профилографы).
Карты применения	Растр/вектор	Журнал выполненных работ: фактически внесенное количество воды, удобрений или пестицидов (особенно важно для VRA).
Карты урожайности	Растр	Исторические данные о хозяйственной урожайности. Критически важны для определения зон низкой продуктивности.

4.3 Атрибутивная база данных цифрового двойника орошаемого поля

Создание атрибутивной базы данных для цифрового двойника орошаемого поля - это основа для сбора, хранения и анализа всех данных, которые описывают поле, его состояние, окружающую среду, управление и результаты. Это позволяет принимать обоснованные решения и моделировать будущие сценарии. Ниже представлена детальная структура атрибутивной базы данных, организованная по таблицам с указанием полей, типов данных, описания и ограничений.

В основе атрибутивной базы данных ЦД лежит основная таблица для идентификации поля «Орошаемое поле». (таблица 4.6) Данная таблица содержит основную информацию про конкретное поле, орошаемый участок и включает в себя такие данные как:

- Площадь поля в гектарах;
- Геометрические границы поля;
- Информацию об ответственном за поле;
- Информацию об последних изменениях записи.

Таблица 4.6 - Орошаемое поле

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
Field_ID	INT	Уникальный идентификатор поля	PK (Primary Key), NOT NULL, AUTO_INCREMENT
Field_name	VARCHAR (100)	Название поля	NOT NULL
Responsible_ID	INT	Ссылка на ответственного/агронома	FK (Users.UserID, CASCADE)
Area_Ha	DECIMAL (10, 2)	Площадь поля в гектарах	NOT NULL, > 0
Location_WKT	TEXT	Геометрические границы поля в формате WKT (Well-known text) или GeoJSON. Для геопространственного анализа.	NOT NULL
Setup_date	DATE TIME	Дата создания записи цифрового двойника поля	NOT NULL
Last modified date	DATE TIME	Дата последнего изменения записи	NOT NULL

Данные о почве хранятся в таблице «Данные о почве» (таблица 4.7) которая включает в себя основные данные о почвенных характеристиках поля, информация, хранящаяся в таблице:

- Тип почвы;
- Информация о проведении анализа почв (дата проведения, данные о точках отбора проб, глубине слоя к которому относятся данные);
- Результаты агрохимического обследования потенциального плодородия (содержание гумуса)
- Результаты агрохимического обследования эффективного плодородия (гумус, основные элементы питания)

- Данные по влагообеспеченности, полученные с профилографов влажности и температуры почвы.

Таблица 4.7 – Данные о почве

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
Soil_data_ID	INT	Уникальный идентификатор записи данных о почве	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
Field_ID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields.FieldID, CASCADE)
Analysis_date	DATE	Дата проведения анализа почвы	NOT NULL
Depth_cm	INT	Глубина изучаемого слоя почвы, к которой относятся данные	NOT NULL, > 0
Soil_type	VARCHAR (50)	Тип почвы	NOT NULL
pH	DECIMAL (4, 2)	Уровень кислотности почвы	1<pH<10
Organic_matter_Pct	DECIMAL (4, 2)	Уровень содержания гумуса в %	NOT NULL, > 0
Salinity_dS_m	DECIMAL (4, 2)	Уровень засоленности (децисименс на метр)	NOT NULL, > 0
N_ppm	DECIMAL (6, 2)	Содержание азота мг/100г	NOT NULL, > 0
P_ppm	DECIMAL (6, 2)	Содержание фосфора мг/100г	NOT NULL, > 0
K_ppm	DECIMAL (6, 2)	Содержание калия мг/100г	NOT NULL, > 0
Location_WKT	TEXT	Геометрическая привязка точки отбора пробы	NOT NULL

Данные о фазах развития культуры хранятся в таблице «Вегетационная фаза». (таблица 4.8) Данная часть базы данных включает в себя информацию о конкретных поливных культурах:

- Данные о культуре (вид, сорт);
- Данные о посеве/уборке культуры;
- Данные об урожайности (планируемая, фактическая);
- Данные о текущей стадии развития культуры.

Таблица 4.8 – Вегетационная фаза

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
CropCycleID	INT	Уникальный идентификатор фазы развития культуры	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
FieldID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields.FieldID, CASCADE)
CropType	VARCHAR (100)	Вид культуры	NOT NULL
Variety	VARCHAR (100)	Сорт культуры	NOT NULL
PlantingDate	DATE	Дата посева/посадки	NOT NULL
HarvestDate_Est	DATE	Предполагаемая дата сбора урожая	NOT NULL
HarvestDate_Actual	DATE	Фактическая дата сбора урожая	NOT NULL
TargetYield_t_ha	DECIMAL (6, 2)	Планируемая урожайность (тонн/га)	NOT NULL, > 0
ActualYield_t_ha	DECIMAL (6, 2)	Фактическая урожайность (тонн/га)	NOT NULL, > 0
GrowthStage_Cur	VARCHAR (50)	Текущая фаза развития культуры	NOT NULL

Метеорологические данные получаемые с метеостанции установленной в месте проведения исследований хранятся в таблице «Данные о погодных условиях». (таблица 4.9) Данная таблица хранит такие данные как:

- Данные об источнике данных;
- Данные о дате и времени прогнозов;
- Тип данных;
- Данные о погоде (температура воздуха, относительная влажность, осадки, солнечная радиация, скорость ветра, эвапотранспирация).

Таблица 4.9 – Данные о погодных условиях

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
Weather_ID	BIGINT	Уникальный идентификатор записи погодных данных	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
Field_ID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields.FieldID, CASCADE)
Timestamp	DATETIME	Дата и время измерения/прогноза	NOT NULL
Data_type	VARCHAR (20)	Тип данных (Измерение, Прогноз)	NOT NULL
AirTemperature_C	DECIMAL (4, 2)	Температура воздуха (°C)	
Relative_humidity_Pct	DECIMAL (4, 2)	Относительная влажность (%)	NOT NULL, >0...<100
Precipitation_mm	DECIMAL (5, 2)	Осадки за период (мм)	
Solar_radiation_MJ_m2	DECIMAL (6, 2)	Солнечная радиация (МДж/м²)	
Wind_speed_m_s	DECIMAL (4, 2)	Скорость ветра (м/с)	
ReferenceET_mm	DECIMAL (5, 2)	Расчетная эталонная эвапотранспирация (ET0) (мм)	NOT NULL
Evapotranspiration_mm	DECIMAL (5, 2)	Фактическая эвапотранспирация (ETC) (мм)	NOT NULL
Source	VARCHAR (50)	Источник данных	NOT NULL

Данные, получаемые с датчиков, установленных на участках орошения хранятся в таблице «Данные с установленных датчиков» (таблица 4.10) и включают в себя информацию о:

- Месторасположение датчиков;
- Тип датчика;
- Принцип работы датчика;
- Информацию об измерении (единица измерения, глубина).

Таблица 4.10 – Данные с установленных датчиков

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
ReadingID	BIGINT	Уникальный идентификатор показания датчика	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
FieldID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields. FieldID, CASCADE)
Timestamp	DATETIME	Дата и время измерения	NOT NULL
SensorType	VARCHAR(50)	Тип датчика (Влажность почвы)	NOT NULL
SensorID_Ext	VARCHAR(100)	Внешний ID датчика	NOT NULL
Unit	VARCHAR(20)	Единица измерения (например, %, °C)	NOT NULL
Depth_cm	INT	Глубина изучаемого слоя (для почвенных датчиков)	NOT NULL, > 0
Sensors_Data	DECIMAL (6, 2)	Данные получаемые с датчиков	NOT NULL
Location_WKT	TEXT	Геометрическая привязка местоположения датчика	NOT NULL

Данные об агротехнических мероприятиях, проводимых на орошаемом поле хранятся в таблице «Учет агротехнический мероприятий» (таблица 4.11), журнал учета всех операций состоит из таких данных как:

- Тип действия (полив, внесение удобрений и т.д.);
- Статус действия;
- Количество затраченных ресурсов (объем воды, количество удобрений)
- Данные о дате проведения операции;
- Данные о географической привязке места операции.

Таблица 4.11- Учет агротехнический мероприятий

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
ActionID	BIGINT	Уникальный идентификатор действия	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
FieldID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields.FieldID, CASCADE)
CropCycleID	INT	Ссылка на фазу развития культуры, если действие к нему относится	FK (CropCycles.CropCycleID, NULLABLE)
ActionTimestamp	DATETIME	Дата и время начала/проведения мероприятия	NOT NULL
ActionType	VARCHAR (50)	Тип действия (Полив, внесение удобрений)	NOT NULL
Status	VARCHAR (20)	Статус действия (Запланировано, выполнено, отменено)	NOT NULL
AppliedVolume_m3	DECIMAL (10, 2)	Фактическая поливная норма (м³/га)	NOT NULL, > 0
AppliedNutrientType	VARCHAR (50)	Тип/марка удобрения	NOT NULL
AppliedAmount_kg_ha	DECIMAL (8, 2)	Количество примененного вещества (кг/га)	NOT NULL, > 0
OperatorName	VARCHAR (100)	Имя ответственного за исполнение	
Notes	TEXT	Дополнительные комментарии к действию	
Location_WKT	TEXT	Геометрическая привязка зоны, где проводилось действие	NOT NULL

Основанные на результате моделирования прогнозы цифрового двойника заносятся в таблицу «Результаты моделирования» (таблица 4.12) в ней содержатся такие данные как:

- Дата и время проведения расчета;
- Данные о выбранном алгоритме расчета;
- Данные о расчетных параметрах;

- Данные о периоде действия прогноза;
- Рекомендации системы;
- Географическая привязка к зоне орошаемого поля.

Таблица 4.12 - Результаты моделирования

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
ResultID	BIGINT	Уникальный идентификатор результата моделирования	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
FieldID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields.FieldID, CASCADE)
CropCycleID	INT	Ссылка на фазу развития культуры, если результат к нему относится	FK (CropCycles.CropCycleID, NULLABLE)
CalculationTimestamp	DATETIME	Дата и время проведения расчета/моделирования	NOT NULL
ModelVersion	VARCHAR (50)	Версия используемой модели или алгоритма	NOT NULL
ParameterCalculated	VARCHAR (100)	Расчетный параметр (Дефицит влаги, Потребность в N)	NOT NULL
PredictedValue	DECIMAL (10, 4)	Прогнозное значение	NOT NULL
Unit	VARCHAR (20)	Единица измерения прогнозного значения	NOT NULL
ValidFrom	DATETIME	Период действия прогноза (от)	NOT NULL
ValidTo	DATETIME	Период действия прогноза (до)	NOT NULL
RecommendedAction	TEXT	Рекомендация системы	NOT NULL
Result_WKT	TEXT	Геометрическая привязка зоны, к которой относится результат (для зонирования)	NOT NULL

Данные о расходовании ресурсов при проведении поливов или других агротехнических мероприятиях хранятся в таблице «Потребление ресурсов» (таблица 4.13), данная составляющая атрибутивной базы данных, содержит такую информацию как:

- Тип ресурса (вода, энергия, удобрения);

- Количество потребления ресурса;
- Единица измерения;
- Дата и время проведения мероприятия.

Таблица 4.13 - Потребление ресурсов

Название	Тип данных	Описание	Ограничения
Consumption_ID	BIGINT	Уникальный идентификатор записи потребления	PK, NOT NULL, AUTO_INCREMENT
Field_ID	INT	Ссылка на поле	FK (Fields.FieldID, CASCADE)
Crop_Cycle_ID	INT	Ссылка на цикл культуры	FK (CropCycles.CropCycleID, NULLABLE)
Date	DATE	Дата, к которой относится запись	NOT NULL
Resource_Type	VARCHAR (50)	Тип ресурса (Вода, Удобрения N, Удобрения P)	NOT NULL
Consumed_Amount	DECIMAL (12, 4)	Потребленное количество	NOT NULL
Unit_of_measure	VARCHAR (20)	Единица измерения (м ³ , кВтч, кг)	NOT NULL

4.4 Алгоритмы функционирования компьютерных программ цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья

Для реализации потенциала цифрового двойника орошаемого поля в условиях Саратовского Заволжья требует создания специализированного прикладного программного обеспечения и алгоритма работы. Подробный алгоритм функционирования цифрового двойника орошаемого поля, представлен на рисунке 4.12.

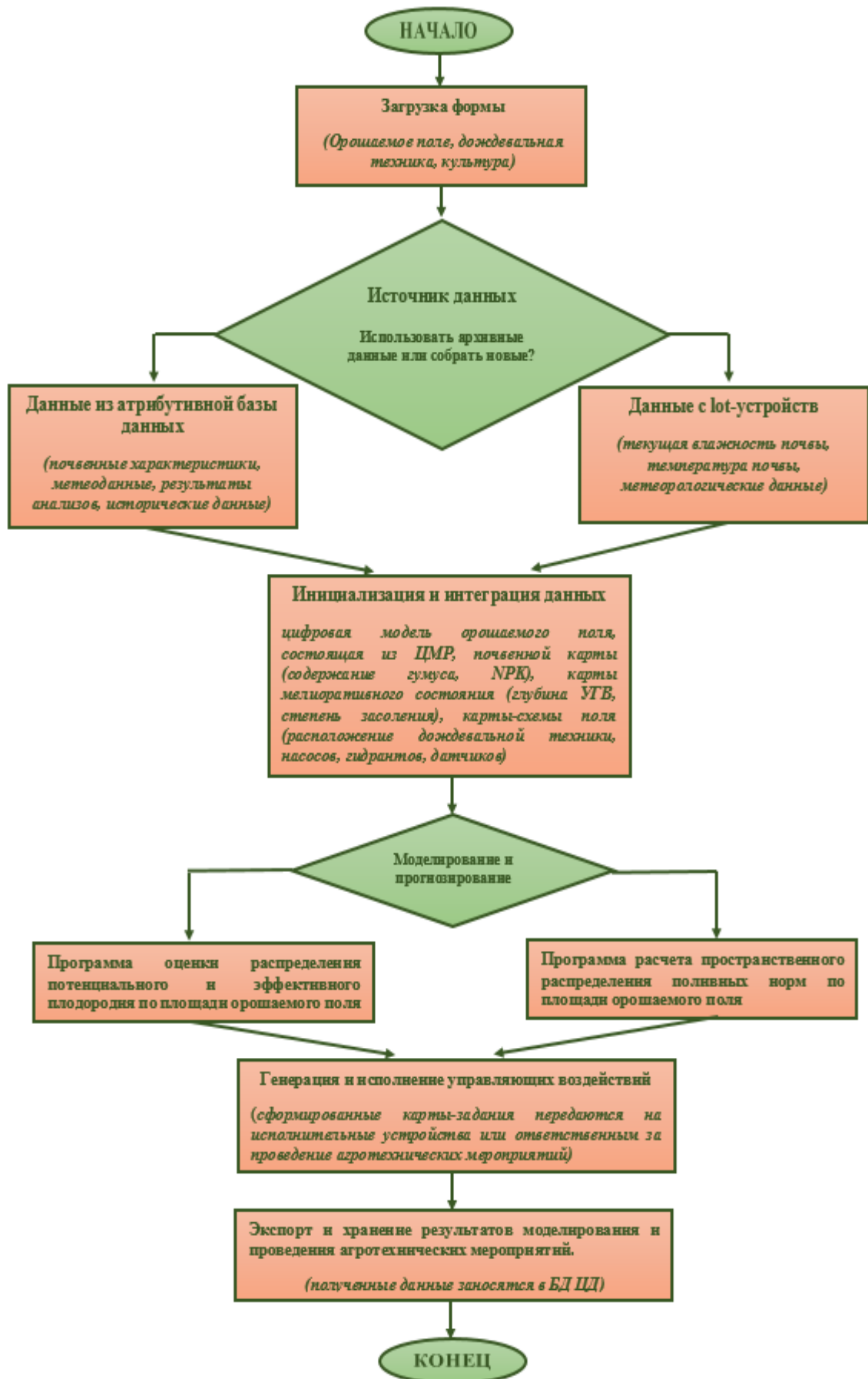


Рисунок 4.12 – Алгоритм работы цифрового двойника орошаемого поля

Компьютерные программы в данной технологии выступают связующим звеном между массивом входных данных занесенными в атрибутивную базу данных и исполнительными механизмами (дождевальная техника, системы внесения удобрений).

Основная цель разработки программного комплекса - автоматизация процесса принятия управленческих решений при эксплуатации поливных земель для достижения максимально возможной урожайности при рациональном использовании водных, энергетических и материальных ресурсов.

В основу программ положены принципы геоинформационных систем (ГИС) и систем поддержки принятия решений (СППР).

Подробный алгоритм программы оценки пространственного распределения состояния потенциального и эффективного плодородия орошаемого поля представлен на рисунке 4.13.

Выходные данные программы:

- Картограммы распределения потенциального плодородия (гумуса) по площади орошаемого поля;
- Картограммы распределения показателей основных элементов питания ($N-NO_3$, P_2O_5 , K_2O мг/кг) по площади орошаемого поля.

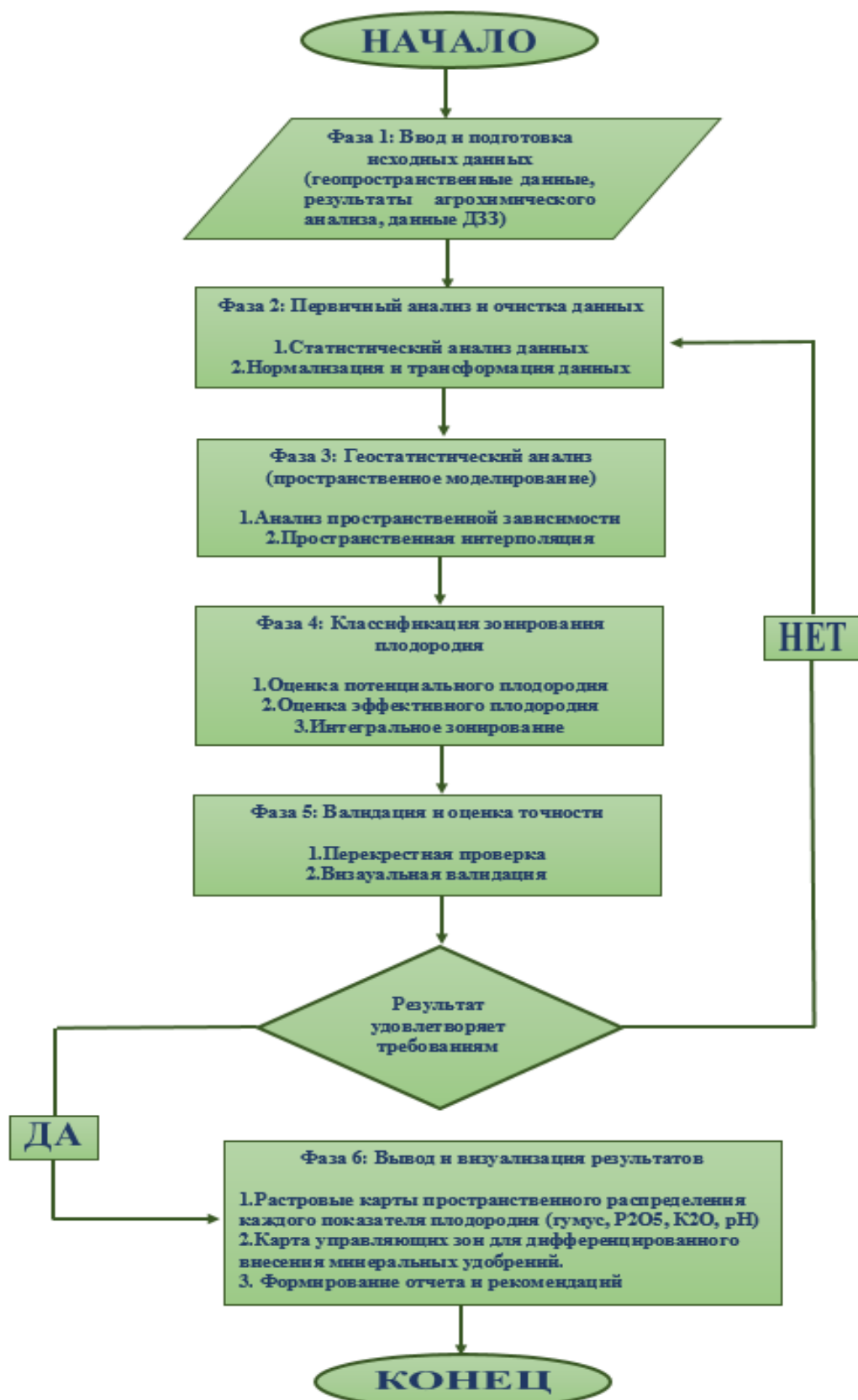


Рисунок 4.13 – Алгоритм работы программы оценки пространственного распределения потенциального и эффективного плодородия почв орошаемого поля

Подробный алгоритм работы программы пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля представлен на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14 – Алгоритм работы программы пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля

Выходные данные программы:

- Пространственная карта распределения поливных норм.
- Растровое изображение или векторные полигоны с указанием требуемой нормы полива (в мм или м³/га) для каждой ячейки поля.

Разработанный комплекс программ позволяет перейти от стратегии «средних значений по полю» к стратегии «прецизионного управления каждым микро-сегментом поля». Для условий Саратовского Заволжья это обеспечивает адаптивность системы орошения к высокой изменчивости погодных условий и почвенного покрова, минимизируя антропогенную нагрузку на орошаемые агроландшафты.

Разработанное программное обеспечение является инструментом материализации цифрового двойника, превращая теоретическую информационную модель в действенный механизм повышения эффективности эксплуатации орошаемых земель.

Разработанные программы использования информации цифрового двойника при эксплуатации поливных земель взаимосвязаны между собой, данные сведены в таблицу 4.14.

Таблица 4.14 - Интеграция программы расчета поливных норм с индексами плодородия

Программа оценки плодородия	Влияние на программу расчета поливных норм
Карта пространственного распределения потенциального плодородия (PFI)	Определяет глубину расчётного слоя $h_{(x,y)}$
Карта пространственного распределения эффективного плодородия (EFI)	Корректирует начало полива: при высоком EFI (много удобрений) нельзя допускать водного стресса растений; при низком EFI можно допустить лёгкий дефицит.
Карта риска засоления	Устанавливает коэффициент $\alpha=0,7-0,9$ в формуле для $m(x, y)$, чтобы не достигать полной НВ, для участков с риском засоления.
Данные вегетационных индексов	Используются для интерполяции данных: если в зоне с высоким EFI влажность по датчикам в порядке, но NDVI низкий значит, проблема не в воде, а в питании или болезнях.

Выводы по четвертой главе

1. Полученные результаты полевых и лабораторных исследований почв опытного участка подтверждают необходимость перехода к дифференцированному управлению водными ресурсам и элементами минерального питания на основе технологий ЦД, способного учитывать внутриполевую пестроту почвенного плодородия.

2. Разработанная цифровая карта орошаемого поля, наполнена необходимыми компонентами для оптимальной оценки состояния опытного участка. Определены 4 ключевые группы слоев цифровой карты, необходимых для корректного получения данных и объективного анализа, различающихся по частоте обновления.

3. Созданная атрибутивная база данных для хранения информации цифрового двойника орошаемого поля, является полноценным инструментом для хранения необходимой информации для моделирования процессов и сбора данных. Основным отличием атрибутивной базы данных от существующих аналогов является комплексный подход, ориентированный на информационное обеспечение всех этапов функционирования цифрового двойника орошаемого поля: от сбора первичных данных до моделирования процессов и составлению рекомендаций по проведению агротехнических мероприятий для условий Саратовского Заволжья.

4. Разработанный алгоритм функционирования цифрового двойника орошаемого поля адаптирован для погодных, климатических, водно-физических, агрохимических, почвенно-мелиоративных и вегетационных условий произрастания поливных культур Саратовского Заволжья. Созданные алгоритмы и компьютерные программы использования информации цифрового двойника при эксплуатации поливных земель, являются связующим звеном между массивом входных данных занесенными в атрибутивную базу данных и исполнительными механизмами (дождевальная техника, системы внесения удобрений).

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ПРИМЕРЕ ОРОШАЕМОГО ПОЛЯ УНПО «ПОВОЛЖЬЕ» БАВИЛОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

5.1 Методический подход к оценке эффективности

Степень экономической эффективности от внедрения технологий цифрового двойника в орошаемое земледелие, используемых для моделирования процессов и оптимизации процесса управления орошаемыми землями, определяется их результативностью, в первую очередь за счет сокращения затрат на водные ресурсы при проведении поливов.

Оценка экономической эффективности выполнена путём сравнения двух вариантов управления орошением на поле площадью 90 га с тёмно-каштановыми почвами при возделывании сои, разделенного на опытный участок, находящийся под управлением цифровым двойником площадью 60 га и контрольный участок площадью 30 га соответственно:

Вариант традиционный (до внедрения ЦД) - полив дождевальная машиной кругового действия «Zimmatic» по предварительно заданному графику проведения поливов, единой поливной нормой, без автоматической обратной связи, управление насосной станцией и поливными нормами осуществляется оператором на основе визуальной оценки состояния влажности почвы.

Вариант с внедрением ЦД – управление поливом с применением цифрового двойника орошаемого поля, включающего сеть почвенных датчиков Kaipos, метеостанцию «Сокол-М», блок моделирования процессов и автоматическое регулирование насосной станции, где поле разделено на элементарные участки, на каждый из которых рассчитывается индивидуальная поливная норма, а близкие по норме участки объединяются в сектора для сокращения износа техники.

Главной задачей разработки являлось ресурсосбережение при гарантированном сохранении продуктивности. Исходя из этого, экономический эффект от внедрения технологий ЦД формируется за счёт сокращения прямых эксплуатационных затрат на водные ресурсы.

5.2 Затраты на внедрение системы цифрового двойника

Для внедрения на опытном участке орошаемого поля технологий ЦД, необходимо закупить определенное оборудование, для сбора данных о состоянии почвы, метеорологических условиях, оборудование для модернизации дождевальной техники. Данные по закупке необходимого оборудования, сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Составляющие технического обеспечения ЦД

Элементы	Модель	Количество	Цена за единицу в рублях
Lot-устройства	Kaipos	10	1000000
Метеостанция	Сокол-М	1	250000
Дооснащение дождевальной машины элементами VRI (секторные электроклапана, блок управления)			700000

Итого затраты на техническое обеспечение ЦД орошаемого поля равны:

$$1000000 + 250000 + 700000 = 1950000 \text{ рублей}$$

Для корректной оценки характеристик почв опытного участка необходимо провести агрохимический анализ почв на основные элементы питания (гумус, NPK).

Агрохимическое обследование орошаемого поля места проведения исследования, выполнялось однократно перед закладкой полевого опыта в 2023 году. Обследование включало полевой отбор почвенных образцов,

лабораторные анализы по стандартному перечню показателей (гумус, нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий, pH водной вытяжки).

В соответствии с методикой проведения полевого опыта, площадь опытного (60 га) и контрольного (30 га) участков была разбита на элементарные участки размером 0,5 га. Таким образом, общее количество отобранных, смешанных проб, составило:

На опытном участке:

$$60 \text{ га} \div 0,5 \text{ га} = 120 \text{ образцов}$$

На контрольном участке:

$$30 \text{ га} \div 0,5 \text{ га} = 60 \text{ образцов}$$

Итого, оптимальное количество проб для агрохимического анализа на основные элементы питания составляет: 180 образцов.

Состав и величина затрат на проведение полного цикла агрохимического анализа почв орошаемого поля представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Затраты на проведение агрохимического анализа почв за 2023 год

Статья затрат	Количество единиц	Стоимость единицы в рублях	Итоговая сумма в рублях
Лабораторный анализ одного образца (комплекс из 5 показателей: гумус, N-NO ₃ , P ₂ O ₅ , K ₂ O, pH)	180	2000	360000
Камеральная обработка результатов, построение картограмм	1	45000	45000

Таким образом, единовременные затраты на получение актуальной и объективной информации о распределении показателей плодородия почв орошаемого поля места проведения исследований составили 405000 рублей.

Итого затраты на техническое и информационное обеспечение цифрового двойника орошаемого поля, равны: $1950000 + 405000 = 2355000$ рублей.

5.3 Расчет экономической эффективности за счет снижения расхода водных ресурсов при проведении поливов

Метеорологические условия поливных сезонов 2023–2025 годов, характеризовались типичными для сухостепного Заволжья дефицитом естественного количества осадков, что потребовало проведению пяти вегетационных поливов в фазы развития возделываемой культуры.

Контрольный участок орошаемого поля поливался равномерно, по всей площади единой поливной нормой 400 м³/га. Опытный участок находящийся под управлением ЦД, на основе результатов расчета программы пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля, поливался дифференцированной поливной нормой для каждого элементарного участка, близкие по значениям участки объединялись в единые сектора. Фактические поливные нормы опытного и контрольного участков, сведены в таблицы 5.3-5.5.

Таблица 5.3 - Поливные нормы на контрольном и опытном участках в м³/га за 2023 год

Номер полива	Поливная норма на контрольном участке м ³ /га	Поливная норма на опытном участке м ³ /га		
		Средняя	Минимальная	Максимальная
1	400	320	230	390
2	400	335	260	400
3	400	325	245	395
4	400	330	255	390
5	400	330	270	395
Среднее значение	400	328	-	-
Оросительная норма м ³ /га	2000	1640	-	-

Таблица 5.4 - Поливные нормы на контрольном и опытном участках в м³/га за 2024 год

Номер полива	Поливная норма на контрольном участке м ³ /га	Поливная норма на опытном участке м ³ /га		
		Средняя	Минимальная	Максимальная
1	400	305	220	380
2	400	330	250	395
3	400	315	240	390
4	400	320	260	385
5	400	330	270	390
Среднее значение	400	320	-	-
Оросительная норма м ³ /га	2000	1600	-	-

Таблица 5.5 - Поливные нормы на контрольном и опытном участках в м³/га за 2025 год

Номер полива	Поливная норма на контрольном участке м ³ /га	Поливная норма на опытном участке м ³ /га		
		Средняя	Минимальная	Максимальная
1	400	295	210	370
2	400	310	235	380
3	400	300	220	375
4	400	315	240	370
5	400	310	250	375
Среднее значение	400	304	-	-
Оросительная норма м ³ /га	2000	1520	-	-

Исходя из данных приведенных в таблицах, можно сделать вывод о том, что управление опытным участком на основе технологий ЦД, позволило сократить оросительную норму в среднем за годы исследования на 20%. При этом количество поливов не изменилось, пространственное распределение оросительной воды по площади орошаемого поля, позволило исключить

переувлажнение в участках понижения рельефа, тем самым увеличить равномерность распределения влаги.

Для орошаемого поля объем оросительной воды (V) за поливной сезон определяется по формуле:

$$V = S \times \text{количество поливов} \times \text{поливная норма} \quad (5.1)$$

Таким образом, объем оросительной воды для контрольного участка ($V_{\text{контроль}}$) равен:

$$V_{\text{контроль}} = 30 \times 5 \times 400 = 60000 \text{ м}^3$$

Объем оросительной воды на опытном участке ($V_{\text{опыт}}$) в среднем за три года исследований с экономией поливной нормы 20 %, будет равен:

$$V_{\text{опыт}} = 60 \times 5 \times 320 = 96000 \text{ м}^3$$

Если на опытном участке полив проводился по традиционному методу, единой поливной нормой, объем оросительной нормы был бы равен:

$$V_{\text{опыт}} = 60 \times 5 \times 400 = 120000 \text{ м}^3$$

Таким образом, абсолютная экономия оросительной воды за поливной сезон на опытном участке под управлением ЦД, составила:

$$120000 \text{ м}^3 - 96000 \text{ м}^3 = 24000 \text{ м}^3$$

Расчет стоимости 1 м³ оросительной воды для хозяйства складывается из платы за забор воды по договору с ФГБУ Управление «Саратовмелиоводхоз»: на первое полугодие (с 1 января по 30 июня) – 19,66 руб./м³, за второе полугодие – 17,01 руб./м³.

Суммарная себестоимость 1 м³; оросительной воды равна:

1 полив – 19,66 руб./м³

2 - 5 поливы – 17,01 руб./м³

Годовая экономия денежных средств при проведении поливов, за счет применения технологий ЦД на опытном участке составила:

Экономия воды за один полив составляет:

$$24000 \div 5 = 4800 \text{ м}^3$$

Тогда экономия денежных средств за первый полив равна:

$$4800 \times 19,66 = 94368 \text{ рублей}$$

Экономия денежных средств за 2 - 5 поливы, равна:

$$4800 \times 4 \times 17,01 = 326592 \text{ рубля}$$

Исходя из вышеизложенного, годовая экономия денежных средств при проведении поливов на опытном участке, равна:

$$94368 + 326592 = 420960 \text{ рублей}$$

5.4 Экономический эффект и сроки окупаемости внедрения технологий

Годовой экономический эффект от внедрения цифрового двойника складывается из экономии стоимости воды при проведении поливов: 420960 рублей.

Срок окупаемости капитальных вложений (без учёта дисконтирования) равен: $2355000 \div 420960 \approx 5,6$ лет.

Исходя из вышеизложенного, внедрение технологий цифрового двойника на орошаемое поле площадью 60 га, которые обеспечивают пространственное распределение поливных норм по площади поля и 20 % экономию водных ресурсов, является экономически выгодным, так как, вложения окупаются меньше чем за 6 лет, после чего хозяйство ежегодно получает чистую прибыль порядка 420000 рублей с данного участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в 2023-2025 годах исследования на темно-каштановой почве сухостепной зоны Саратовского Заволжья по изучению применения цифрового двойника орошаемого поля позволили сделать следующие выводы:

1. Современные технологии точного или прецизионного земледелия позволяют дифференцированно управлять водным и питательным режимом орошаемых культур в зависимости от условий, сложившихся не только на локальном поле, но и на отдельных его частях, в каждом микро-сегменте. Однако, для такого дифференцированного управления необходимы массивы и модели анализа и оценки геопространственных данных. Цифровой двойник, объединяющий согласно определению, данные об объекте управления и модели его функционирования, является комплексным решением для эффективного управления орошаемым полем. Технологии цифрового двойника позволяют управлять отдельными участками орошаемого поля, за счет интеграции данных мониторинга, сенсорных датчиков, вычислительных методов и моделирования процессов.

2. Теоретическим обоснованием разработки цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья является ориентация прежде всего на учет почвенной пространственной неоднородности условий произрастания поливных культур в границах отдельного орошаемого поля с помощью геоинформационных технологий и математических моделей почвенных, мелиоративных и вегетационных процессов.

3. Созданная цифровая карта цифрового двойника орошаемого поля включает в себя необходимые для корректного получения данных и объективного анализа 4 ключевые группы слоев, которые различаются по частоте обновления. Разработанная атрибутивная база данных цифрового двойника орошаемого поля состоит из 8 основных таблиц, необходимых для комплексного информационного обеспечения всех моделей функционирования орошаемого поля: от сбора первичных данных до

моделирования процессов и составления рекомендаций по проведению агротехнических мероприятий.

4. Разработанные алгоритмы и компьютерные программы моделей функционирования орошаемого поля учитывают погодные, климатические, водно-физические, агрохимические, почвенно-мелиоративные и вегетационные условия произрастания поливных культур на орошаемых землях Саратовского Заволжья. Компьютерные программы на основе математического моделирования производят оценку пространственного распределения потенциального и эффективного плодородия и расчет пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля.

5. Оценка экономической эффективности внедрения цифрового двойника орошаемого поля в УНПО «Поволжье» Вавиловского университета на площади 60 га показала, что за счет агротехнически обоснованного снижения водоподачи на 20 % и, соответственно, затрат при проведении поливов на 420 тыс. руб., капитальные вложения (lot-устройства, дооснащение дождевальной техники, проведение агрохимического анализа) окупятся за 6 лет.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

На темно-каштановой почве в сухостепной зоне Саратовского Заволжья, для достижения эффективного орошения, сельскохозяйственным товаропроизводителям необходимо применять цифровой двойник орошаемого поля включающего в состав цифровую карту орошаемого поля организованную в виде геоинформационной системы (ГИС) с использованием программного обеспечения, состоящую из 4 ключевых групп слоев, атрибутивную базу данных для использования и хранения информации цифрового двойника, включающую в себя 8 основных таблиц, комплекс компьютерных программ основанных на математическом моделировании, для оценки состояния распределения потенциального и эффективного плодородия почв и расчета пространственного распределения поливных норм, которые позволяют обеспечить ресурсоэффективное управление орошаемым полем, путем сокращения затрат на агротехнические мероприятия, дают возможность получения точной и объективной информации о состоянии поля и оптимизируют процесс принятия решений.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие исследования могут быть направлены на масштабирование предложенной системы на более крупные орошаемые массивы, интеграцию с автономными сельскохозяйственными машинами и робототехникой, а также на разработку более сложных моделей с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта для адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдразаков, Ф.К. Гидрофизические функции почвогрунтов Саратовского Заволжья / Ф.К. Абдразаков, О.В. Михеева, Ф.В. Серебренников // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 8. – С. 64-68. – DOI 10.28983/asj.y2019i8pp64-68. – EDN REBFEL.
2. Абдразаков, Ф. К. К вопросу об автоматизации системы орошения и полива в открытом грунте / Ф.К. Абдразаков, О.В. Михеева, Ф.В. Серебренников, И.А. Михеев // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 70-73. – DOI 10.28983/asj.y2019i5pp70-73. – EDN KYKTLV.
3. Абдразаков, Ф.К. Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного и мелиоративного производства Саратовской области / Ф.К. Абдразаков, С.В. Материнский // Актуальные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы VII очной Международной научно-практической конференции, Саратов, 15–16 марта 2018 года / Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2018. – С. 12-14. – EDN YXABXE.
4. Александровская, Л.А. Прецизионное орошение как инструмент повышения эколого-экономической эффективности мелиоративной деятельности / Л. А. Александровская, П. В. Поляков // Экономика и экология территориальных образований. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 41-46. – DOI 10.23947/2413-1474-2020-4-4-41-46. – EDN EAYMZJ.
5. Ан, С.И. Применение искусственного интеллекта в точном земледелии как вектор развития агропромышленного комплекса / С. И. Ан, А. Ю. Николенко // Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Абакан, 13–15 ноября 2024 года. – Абакан: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования "Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова", 2024. – С. 7-8. – EDN HZDOCK.

6. Аржанухина, Е.В. Цифровизация в сельском хозяйстве / Е.В. Аржанухина, Н.В. Медведев // Основы рационального природопользования: Материалы VII Национальной конференции с международным участием, 2021, С. 77-80.

7. Афанасьев, Р.А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия / Р. А. Афанасьев // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 3. – С. 46-53. – EDN JXDBDF.

8. Афанасьев, Р.А. Дистанционная диагностика азотного питания растений / Р. А. Афанасьев // Плодородие. – 2020. – № 6(117). – С. 26-29. – DOI 10.25680/S19948603.2020.117.08. – EDN AVBDTH.

9. Афанасьев, Р.А. Дистанционная диагностика азотного питания растений с использованием БПЛА / Р. А. Афанасьев // Плодородие почв России: состояние и возможности: Сборник статей (к 100-летию со дня рождения Тамары Никандровны Кулаковской) / Под редакцией В.Г. Сычева. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2019. – С. 191-196. – EDN QAYMCB.

10. Бабичев, А.Н. Метод прецизионного орошения для современных дождевальных машин / А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2019. – № 2(74). – С. 14-17. – EDN YKWJLF.

11. Бабичев, А.Н. Оперативное управление режимом орошения при программировании урожайности сельскохозяйственных культур / А. Н. Бабичев, Г. Т. Балакай, В. А. Монастырский // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 3(27). – С. 83–96. – EDN ZCQAOR.

12. Бабичев, А.Н., Опыт применения технологии прецизионного орошения в Ростовской области / А. Н. Бабичев, В. И. Ольгаренко, В. А. Монастырский, Д. П. Сидаренко // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и

животноводства. – 2019. – № 4(101). – С. 75-86. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10214. – EDN DIQLZV.

13. Бабичев, А.Н. Перспективы использования наземной гиперспектральной аппаратуры для прецизионного орошения сельскохозяйственных культур / А.Н. Бабичев, В.А. Монастырский, В.И. Ольгаренко, В.В. Подлипнов // Геоинформационные технологии в сельском хозяйстве, природообустройстве и защите окружающей среды: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых / под ред. В.В. Афонина. – Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2017. – С. 14–18.

14. Бабичев, А.Н., Система управления широкозахватной дождевальной машины кругового действия для прецизионного орошения / А.Н. Бабичев, В.А. Монастырский, В.И. Ольгаренко [и др.] // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2019. – № 1(73). – С. 195-199. – EDN DWEWYJ.

15. Бабичев, А.Н., Техничко-технологические средства для прецизионного (точного) орошения /, В.А. Монастырский, В.И. Ольгаренко, В.В. Подлипнов // Ресурсосбережение и адаптивность в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур и переработки продукции растениеводства : материалы международной научно-практической конференции, пос. Персиановский, 06 февраля 2020 года. – пос. Персиановский: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный аграрный университет", 2020. – С. 153-158. – EDN YZLIAB.

16. Балакай, Г.Т. Актуальные вопросы совершенствования техники и технологии прецизионного орошения дождеванием / Г.Т. Балакай, В.В. Пляко // Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию окончания Сталинградской битвы, Волгоград, 31 января – 02 2018 года. Том

4. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2018. – С. 56-61. – EDN XVTKMH.

17. Бородычев, В.В., Дедова Э.Б., Сазанов М.А., Лытов М.Н. Моделирование процесса управления водно-солевым режимом почв в условиях орошения // Известия НВ АУК. 2016. №2 (42).

18. Бородычев, В.В. Алгоритм решения задач управления водным режимом почвы при орошении сельскохозяйственных культур / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 8-11. – EDN TLOIVB.

19. Васильев, С.М. На пути к цифровой мелиорации / С.М. Васильев, В.Н. Щедрин, А.В. Слабунова, В.В. Слабунов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2019. – № 4. – С. 5–9. – EDN XJGCNW.

20. Васильев С.М. Стратегия успешного развития мелиорации – прецизионное орошение / С.М. Васильев, А.Н. Бабичев, В.А. Монастырский, В.И. Ольгаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 3(39). – С. 1–22. – DOI 10.31774/2222-1816-2020-3-1-22. – EDN APUOBO.

21. Волкова, Е.А. Использование комплекса средств информационно-технологической поддержки при эксплуатации орошаемых участков / Е.А. Волкова // Мелиорация и гидротехника. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 77–98. – DOI 10.31774/2712-9357-2025-15-1-77-98. – EDN KKXPWK.

22. Ганченко, В.В. Построение карт сельскохозяйственных полей по аэрофотоснимкам различного спектрального диапазона для систем точного земледелия / В.В. Ганченко, А.А. Дудкин, Е.Е. Марушко // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, математика, информатика. – 2017. – № 5(107). – С. 45-48. – EDN VUWLSR.

23. ГОСТ 26205–91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. – Введ. 1993–01–01. – Москва: Издательство стандартов, 1992. – 12 с.

24. ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества: межгосударственный стандарт — М.: ФГБУ «РСТ», 2021. — 18 с.
25. ГОСТ 28268–89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания. — Введ. 1990–07–01. — Москва: Издательство стандартов, 1990. — 12 с.
26. ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат.
27. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — Введ. 2016–07–01. — Москва: Стандартиформ, 2016. — 14 с.
28. ГОСТ Р 51605–2023. Карты цифровые топографические. Общие требования. — Москва: Стандартиформ, 2023.
29. ГОСТ Р 51608–2024. Карты цифровые топографические. Требования к качеству.
30. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — Москва: Стандартиформ, 2021.
31. ГОСТ Р 70318–2022. Инфраструктура пространственных данных. Единая электронная картографическая основа. Общие требования.
32. ГОСТ Р 70611–2022. Мелиорация земель. Методика оценки дистанционными методами технического и экологического состояния. — Москва: Стандартиформ, 2022.
33. Гришаева, О.Ю. Проблемы и перспективы развития цифровых технологий в мелиорации / О.Ю. Гришаева, М.П. Замаховский, Г.В. Ольгаренко [и др.]; под ред. Г.В. Ольгаренко, А.А. Угрюмовой. — Москва: Русайнс, 2022. — 186 с. — ISBN 978-5-466-01429-7. — EDN VQJFKC.
34. Гришин, П.Н. Почвы Саратовской области / П.Н. Гришин, В.В. Кравченко, Е.Н. Куценко [и др.]. — Саратов: Амирит, 2023. — 362 с. — ISBN 978-5-00207-325-2. — EDN JATOXD.

35. Гусак, Е.В. Использование технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве: европейский опыт и применение в России / Е.В. Гусак, А.Ф. Рогачев // Перспективы науки. – 2025. – № 1(184). – С. 14-17. – EDN ZCNLUM.

36. Демакина, И.И. Влияние агроклиматических параметров на ведение полевых работ в условиях изменчивости климата на примере Саратовской области / И.И. Демакина, Б.В. Фисенко, А.И. Пшенцова, Е.В. Бажина // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 1. – С. 17-22. – DOI 10.28983/asj.y2026i1pp17-22. – EDN PVBDNH.

37. Демакина, И.И. Влияние изменчивости климатических условий на агрометеорологические параметры и урожайность сельскохозяйственных культур Саратовской области / И.И. Демакина, Б.В. Фисенко, А.А. Ткачев. – Саратов: Вавиловский университет, 2025. – 170 с. – ISBN 978-5-605-41258-8. – EDN LVYSZS

38. Демакина, И.И. Геоинформационное обеспечение агропромышленного комплекса Саратовской области / И.И. Демакина, Б.В. Фисенко, И.А. Сметанин // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 4. – С. 4–8. – DOI 10.28983/asj.y2025i4pp4-8. – EDN IUBETV

39. Демакина, И.И. Изменение характеристик зимне-весеннего сезона в современных климатических условиях (на примере г. Саратова) / И.И. Демакина, Б.В. Фисенко, Е.В. Завьялова [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 6. – С. 24-27. – DOI 10.28983/asj.y2026i6pp24-27. – EDN JMAOFB.

40. Демакина, И.И. Технология дистанционного мониторинга орошаемых земель УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова» / И.И. Демакина, Б.В. Фисенко // Конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов агрономического факультета ФГБОУ ВО Вавиловский университет по итогам научно-исследовательской, учебно-методической и воспитательной работы за 2021 год: сб. ст. (Саратов,

28 февраля – 4 марта 2022 г.). – Саратов: Амирит, 2022. – С. 15–19. – EDN DYUDYJ.

41. Демакина, И.И. Экстремальность осадков в Саратовской области на фоне современного изменения климата / И.И. Демакина, Б.В. Фисенко, А.А. Гераскина, Е.В. Бажина // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 4. – С. 13-17. – DOI 10.28983/asj.y2026i4pp13-17. – EDN QMWKJS.

42. ДеМерс, М.Н. Географические информационные системы. Основы / пер. с англ. – Москва: ДАТА+, 1999. – 490 с.

43. Дорохов, А.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения / А.С. Дорохов, Д.Ю. Павкин, С.С. Юрочка // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 14–25. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.

44. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов // 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с

45. Дубенок, Н.Н. Аграрная наука в решении задач сохранения и восстановления земельного потенциала, устойчивого развития сельского хозяйства / Н.Н. Дубенок, А.А. Завалин, Г.В. Ольгаренко // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2025. – № S7. – С. 41-47. – DOI 10.7868/S3034519725070062. – EDN BQDYDP.

46. Дубенок, Н.Н. Дистанционное зондирование для решения задач по инвентаризации мелиорированных земель сельскохозяйственного назначения / Н.Н. Дубенок, Ю.В. Чесноков, А.Ф. Петрушин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2023. – № 2. – С. 16-19. – DOI 10.32962/0235-2524-2023-2-16-19. – EDN VSDDMG.

47. Дубенок, Н.Н. Многолетние исследования гидротермического режима агроценозов и системы комбинированного орошения для его регулирования / Н.Н. Дубенок, А.В. Майер // Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – № 2. – С. 3-7. – DOI 10.31857/S2500262722020016. – EDN FZVSGD.

48. Дубенок, Н.Н. Теоретические основы обоснования комплексных мелиораций и управление мелиоративными режимами в агроландшафтах в степной и лесостепной зоне / Н. Н. Дубенок // Научно-агрономический журнал. – 2023. – № 4(123). – С. 16-21. – DOI 10.34736/FNC.2023.123.4.002.16-21. – EDN AMMWCI.

49. Ескова-Левина, В.С. Эволюция агрохимических свойств каштановых почв Саратовского Заволжья при сельскохозяйственном использовании / В.С. Ескова-Левина // Вавиловские чтения - 2008: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Саратовского госагроуниверситета, Саратов, 26–27 ноября 2008 года. Том Часть 3. – Саратов: Издательский центр "Наука", 2008. – С. 135-136. – EDN SMILJ.

50. Журавлева, Л.А. Технология дифференцированного полива широкозахватными дождевальными машинами с внесением удобрений / Л.А. Журавлева, Ю.Н. Гrepечук // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 3. – С. 110-114. – DOI 10.28983/asj.y2025i3pp110-114. – EDN TYJOTE.

51. Заигралов, Ю.А. Разработка геоинформационной системы управления мелиоративным комплексом Саратовской области / Ю.А. Заигралов, В.В. Афонин, В.В. Корсак [и др.] // Научная жизнь. – 2018. – № 5. – С. 98–106. – EDN XRUHAT.

52. Зверьков, М.С. Анализ состояния орошаемых культур по данным дистанционного зондирования Земли с использованием спектрального индекса NDVI / М.С. Зверьков, С.С. Смелова // Экология и строительство. – 2024. – № 1. – С. 24-34. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-01-004. – EDN CHSAEO.

53. Зверьков, М.С. Оценка корреляционной связи между индексами вегетации NDVI и влажности NDMI по данным спутника Sentinel-2 / М.С. Зверьков // International Agricultural Journal. – 2026. – Т. 69, № 3. – С. 110-123. – DOI 10.55186/25880209_2026_10_3_26. – EDN LRTOIG.

54. Зверьков, М.С. Оценка эффективности использования беспилотных авиационных систем при мониторинге мелиоративных объектов / М.С. Зверьков, С.С. Смелова, С.С. Турапин, Т.Г. Степанова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2025. – № 2. – С. 31-33. – DOI 10.32962/0235-2524-2025-2-31-34. – EDN KKTVQA.

55. Зейлигер, А.М. Методы, масштабы и данные дистанционного зондирования в моделях роста и развития агрофитоценозов / А.М. Зейлигер, О.С. Ермолаева // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: материалы III Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2021 г.). – Санкт-Петербург: АФИ, 2021. – С. 20–23. – EDN CILJXS.

56. Зейлигер, А.М. Точное (дифференцированное) орошаемое земледелие - технология повышения эффективности орошения и снижения нагрузки на окружающую среду / А.М. Зейлигер // Сборник научных докладов ВИМ. – 2010. – Т. 2. – С. 633-638. – EDN OZAMQH.

57. Зейлигер, А.М. Формирование паттерн потоков суммарного испарения, влажности поверхностного слоя почвенного покрова и NDVI в 2022 г. при орошении посева сои дождевальная машина Каскад (УНПО «Поволжье», Энгельский район Саратовской области) / А.М. Зейлигер, О.С. Ермолаева, А.В. Доброхотов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 21-й Междунар. конф. (Москва, 13–17 ноября 2023 г.). – Москва: ИКИ РАН, 2023. – С. 368. – EDN TCNRQC.

58. Камышова, Г.Н. Математическое моделирование в компонентах природы (интерактивный курс) / Г.Н. Камышова, В.В. Корсак, А.С. Фалькович, О.Ю. Холуденева. – Саратов: СГАУ им. Н. И. Вавилова, 2012. – 155 с.

59. Камышова, Г.Н. Разработка цифрового инструментария для поддержки принятия решений в орошаемом земледелии / Г.Н. Камышова,

Н.Н. Терехова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 7(121). – DOI 10.23670/IRJ.2022.121.7.067. – EDN LVJBLV.

60. Качинский, Н.А. Физика почвы / Н.А. Качинский. – М.: Высшая школа, 1970. – 358 с.

61. Кижяева, В.Е. Оптимизация методов управления плодородием орошаемых земель аридной зоны Поволжья / В.Е. Кижяева, В.О. Пешкова // Орошаемое земледелие. – 2022. – № 1(36). – С. 13-19. – DOI 10.35809/2618-8279-2022-1-1. – EDN JOWUIF.

62. Кирейчева, Л. В. Информационно-коммуникационная система регулирования параметров мелиоративного состояния агроэкосистемы / Л. В. Кирейчева, А. Д. Тимошкин, А. Л. Аветисян // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 13-18. – DOI 10.26897/1997-6011-2022-3-13-18. – EDN ZKDUQG.

63. Кирейчева, Л. В. Методология прецизионного регулирования показателей агроэкосистемы на мелиорируемых землях / Л. В. Кирейчева, Е. А. Лентяева // Эффективное использование мелиорируемых земель и водных ресурсов в агропромышленном комплексе России: Сборник научных трудов, Москва, 18–19 ноября 2020 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2021. – С. 48-55. – EDN ZSOMHZ.

64. Козенко, К.Ю. Вегетационные индексы и методы дистанционного зондирования агроландшафтов как фундамент развития прецизионного орошения / К.Ю. Козенко, О.П. Комарова // Орошаемое земледелие. – 2021. – № 2. – С. 63-66. – DOI 10.35809/2618-8279-2021-2-9. – EDN SYTYOI.

65. Колганов, А. В. Потенциал мелиорированных земель России / А. В. Колганов, Р. С. Масный, Г. Т. Балакай // Мелиорация и гидротехника. – 2026. – Т. 16, № 1. – С. 1-18. – DOI 10.31774/2712-9357-2026-16-1-1-18. – EDN JLMEVA.

66. Колесникова, В.М. Почвенная атрибутивная база данных России / В.М. Колесникова, И.О. Алябина, Л.А. Воробьева [и др.] // Почвоведение. – 2010. – № 8. – С. 899-908. – EDN MUJZHV.

67. Корсак, В.В. Агрохимическая информация для цифрового двойника орошаемого поля / В.В. Корсак, А.В. Кравчук, Б.В. Фисенко, Н.В. Медведев // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы XIII Национальной конференции с международным участием, 2023, С. 309-313.

68. Корсак, В.В. База водно-физических данных в цифровых двойниках орошаемых массивов / В.В. Корсак, Б.В. Фисенко, Р.В. Прокопец, Н.В. Медведев // Основы рационального природопользования: Материалы IX Национальной конференции с международным участием, 2023, С. 79-83.

69. Корсак, В.В. Геоинформационная составляющая систем дистанционного мониторинга сельскохозяйственных угодий и объектов озеленения / В.В. Корсак, Б.В. Фисенко, Н.В. Медведев [и др.] // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы X Международной научно-практической конференции, 2023, С. 100-105.

70. Корсак, В.В. Методы дистанционного зондирования в точном земледелии на орошаемых землях Поволжья / В.В. Корсак, Б.В. Фисенко, М.Ю. Филиппова [и др.] // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Амирит, 2021. – С. 31–35.

71. Корсак, В.В. Применение ГИС-анализа для оценки природных условий поливного земледелия / В.В. Корсак, Н.А. Пронько, Н.Н. Насыров // Научная жизнь. – 2014. – № 2. – С. 18–24.

72. Корсак, В.В. Проблемы плодородия почв УНПО «Поволжье» Саратовского государственного аграрного университета имени Н. И. Вавилова / В.В. Корсак, С.М. Бакиров, Б.В. Фисенко [и др.] // Основы рационального природопользования: материалы VII Нац. конф. с междунар.

участием. – Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2021. – С. 25–29. – EDN LQCAVM.

73. Корсак, В.В. Современные информационные технологии рационального природопользования на орошаемых землях Поволжья / В.В. Корсак, Н.А. Пронько // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 3. – С. 27–29.

74. Корсак, В.В. Структура базы данных информационной системы управления качеством орошаемых почв / В.В. Корсак, Р.В. Прокопец, Н.В. Медведев, А.А. Зеленская // Основы рационального природопользования: Материалы X Национальной конференции с международным участием, 2024. – С. 91-94.

75. Кравчук, А.В. Агроэкологические режимы орошения кормовых культур в условиях Заволжья для лет различной расчетной обеспеченности / А.В. Кравчук, Р.В. Прокопец, Д.И. Шаврин, Г.С. Донгузов // Системные исследования природно-техногенных комплексов Нижнего Поволжья. – Саратов: ИЦ "Наука", 2007. – С. 92-95. – EDN TIGXHV.

76. Краснощеков, В.Н. Развитие подходов к обоснованию мелиоративного режима агроландшафтов / В.Н. Краснощеков, Г.В. Ольгаренко, Д.Г. Ольгаренко // Природообустройство. – 2024. – № 4. – С. 6-11. – DOI 10.26897/1997-6011-2024-4-6-11. – EDN BFTISA.

77. Левицкая, Н.Г. Современные изменения климата Саратовской области и стратегия адаптации к ним селекции и агротехнологий / Н.Г. Левицкая, И.И. Демакина // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 10. – С. 7-12. – DOI 10.17513/use.37206. – EDN GTBQFK.

78. Личман, Г.И. Система точного земледелия в современных агротехнологиях / Г.И. Личман, Н.М. Марченко, А.Н. Марченко // Сборник научных докладов ВИМ. – 2008. – Т. 2. – С. 557-566. – EDN OZAABT.

79. Марченко, Н.М. Механико-технологические основы компьютеризированного проектирования машинных технологий дифференцированного применения удобрений в системе координатного

земледелия / Н.М. Марченко, Г.И. Личман // Научные и методологические основы разработки перспективных технологий и технических средств для растениеводства: Труды ВИМ. Том 129. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1997. – С. 55-69. – EDN VHJNIB.

80. Медведев, Н.В. Математическое моделирование в мелиорации: обзор применяемых моделей и перспективы развития/Н.В. Медведев, В.В. Корсак//Основы рационального природопользования: Материалы XI Национальной конференции с международным участием, 2025. – С. 151-156.

81. Медведев, Н.В. Особенности условий и перспективы применения прецизионных методов земледелия на орошаемых землях Саратовского Заволжья / Н. В. Медведев, В. В. Корсак, Н. А. Пронько, Т. А. Панкова // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 220–241. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-220-241>.

82. Медведев, Н.В. Программы расчета пространственного распределения поливных норм по площади орошаемого поля / Н.В. Медведев, Н.А. Пронько, В.В. Корсак, К.И. Баклушин//Глобальные вызовы и инновационные решения в мелиоративном комплексе: Материалы Научно-практической конференции с международным участием посвященной 60-летию образования Волжского НИИ Гидротехники и Мелиорации, 2026. – С. 215-220.

83. Медведев, Н.В. Состав и структура цифрового двойника орошаемого поля для условий Саратовского Заволжья / Н.В. Медведев, В.В. Корсак, А.П. Солодовников, Н.А. Пронько, Т.А. Панкова / Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева, 2026, Т.18, №3, С. 144-122, <https://doi.org/.10.36508/RSATU.2026.32.37.015>

84. Митюрева, О.Н. Исследовательский прототип базы данных для прогнозирования водопотребления орошаемых культур / О.Н. Митюрева, Ю.Ю. Каднова, Р.В. Прокопец, В.В. Корсак // Основы рационального

природопользования: материалы VII Нац. конф. с междунар. участием. – Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2021. – С. 37–39.

85. Михайленко, И.М. Дистанционное зондирование земли в сельском хозяйстве / И.М. Михайленко, В.П. Якушев // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – № 6. – С. 12–16. – EDN WZHNON.

86. Михайленко, И.М. Дифференциация управления орошением посевов сельскохозяйственных культур / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 24-29. – EDN YQRJJP.

87. Молчанов, Э.Н. Мониторинг почвенного покрова - основа управления продуктивностью сельскохозяйственных земель / Э.Н. Молчанов, В.А. Рожков, А.Г. Харитон // Проблемы развития АПК региона. – 2010. – Т. 4, № 4. – С. 38-44. – EDN ONWTMT.

88. Монастырский, В.А. Алгоритм расчета доз внесения удобрений в прецизионном земледелии / В.А. Монастырский, А.Н. Бабичев, В.И. Ольгаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2019. – № 1(33). – С. 26–38. – DOI 10.31774/2222-1816-2019-1-26-38. – EDN VVQTYI.

89. Морковин, В.Т. Информационно-советующая система разработки режимов орошения / В.Т. Морковин, О.Ю. Холуденева, В.В. Иванов, Н.А. Пронько, В.В. Корсак // Водосберегающие технологии как основа эффективного использования орошаемых земель: сб. науч. тр. – Саратов: ВолжНИИГиМ, 2003. – С. 122–133.

90. Мячин, М.А., Воеводина Л.А. Опыт применения цифровой карты в QGIS в работе ФГБУ «Управление Ростовмелиоводхоз»/ Мячин, М.А., Воеводина Л.А. // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 203–214.

91. Мячин, М.А. Цифровая карта гидротехнических сооружений и орошаемых участков Пролетарской мелиоративной системы / М.А. Мячин, Л.А. Воеводина // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2025. – № 2(96). – С. 111–122. – EDN MPQSMK.

92. Новиков, А.Е. Прецизионные технологии орошения в повышении устойчивости земледелия к природным изменениям / А.Е. Новиков, А.В. Дранников // Орошаемое земледелие. – 2024. – № 4(47). – С. 45-50. – DOI 10.35809/2618-8279-2024-4-7. – EDN AYRNAJ.

93. Овчинников, А.С. Причины вторичного засоления орошаемых почв Нижнего Поволжья и его прогнозирование на основе математического моделирования влагопереноса / А.С. Овчинников, Н.А. Пронько, А.С. Фалькович, В.В. Бородычев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 2(50). – С. 9-17. – EDN SMOHUX.

94. Ольгаренко, В.И. Алгоритм формирования и расчёта плана посева и полива сельскохозяйственных культур с использованием информационных технологий / В.И. Ольгаренко, В.И. Селюков, И.В. Ольгаренко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 1(25). – С. 124–129. – EDN OWIDYD.

95. Ольгаренко, В.И. Принципы применения элементов технологии точного земледелия и прецизионного орошения в сельскохозяйственном производстве / В.И. Ольгаренко, А.Н. Бабичев, В.А. Монастырский // Новости науки в АПК. – 2018. – № 2-2(11). – С. 23–26. – DOI 10.25930/61sr-d695. – EDN FXVQTY.

96. Ольгаренко, В.И. Система прецизионного орошения в условиях сельскохозяйственной мелиорации / В.И. Ольгаренко, А.Н. Бабичев, В.А. Монастырский // Ресурсосбережение и адаптивность в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур и переработки продукции растениеводства: Материалы международной научно-практической конференции, пос. Персиановский, 07 февраля 2018 года. – пос. Персиановский: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный аграрный университет", 2018. – С. 52-55. – EDN WCCUER.

97. Ольгаренко, Г.В. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: состояние и перспективы устойчивого развития / Г.В. Ольгаренко // Орошаемое земледелие. – 2025. – № 2(49). – С. 14-21. – DOI 10.35809/2618-8279-2025-2-2. – EDN PYCBSU.

98. Остапчик, В.П. Информационно-советующая система управления орошением / В.П. Остапчик, В.А. Костромин, А.М. Коваль [и др.]. – Киев: Урожай, 1989. – 248 с.

99. Переведенцев, Ю.П. Мониторинг современных изменений климата Среднего Поволжья / Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, Б.Г. Шерстюков, Э.П. Наумов // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2010. – Т. 152, № 3. – С. 251-260. – EDN NBQDQF.

100. Постановление комитета государственного регулирования тарифов Саратовской области от 20 декабря 2023 г. № 87 «Об установлении тарифов на техническую воду для потребителей ФГБУ “Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения по Саратовской области”».

101. Пронько, В.В. Агрохимические свойства каштановых почв Саратовского Заволжья и их трансформация при антропогенном воздействии / В.В. Пронько, В.С. Левина, М.Н. Панасов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2010. – № 5. – С. 16-20. – EDN MKURCD.

102. Пронько, В.В. Влияние погодных условий и агротехнических приемов на эффективность удобрений в степном Поволжье / В.В. Пронько, В.В. Корсак, А.Ф. Дружкин // Агрохимия. – 2004. – № 8. – С. 20-26. – EDN ONQDX.

103. Пронько, Н.А. Геоинформационные технологии в проектировании орошаемых участков / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, Т.В. Соколова, Л.С. Бабохина // Вавиловские чтения – 2010: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Саратов, 25–26 ноября 2010 г.): в 3 т. / под

ред. И.Л. Кузнецова. – Саратов: КУБиК, 2010. – Т. 1. – С. 82–84. – EDN VNFSEN.

104. Пронько, Н.А. ГИС-мониторинг мелиоративного состояния орошаемых земель (на примере сухостепного Заволжья) / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, Т.В. Корнева // Мелиорация и водное хозяйство. – 2008. – № 6. – С. 26–29. – EDN JXGCSB.

105. Пронько, Н.А. Изменение плодородия орошаемых каштановых почв Поволжья в процессе длительного использования и научные основы его регулирования / Н.А. Пронько, Л.Г. Романова, А.С. Фалькович. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2005. – 220 с.

106. Пронько, Н.А. Информационные технологии рационального природопользования на орошаемых землях Поволжья / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, О.Ю. Холуденева, Т.В. Корнева. – Саратов: СГАУ им. Н. И. Вавилова, 2009. – 212 с.

107. Пронько, Н.А., Метод расчета доз органических и минеральных удобрений для культур орошаемых севооборотов по прогнозируемому ротационному балансу элементов питания / Н.А. Пронько, В.В. Корсак // Агрохимия, 2001, № 7, С. 66-71.

108. Пронько, Н.А. Методология создания системы мониторинга солевого режима мелиорированных угодий Поволжья / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, А.С. Фалькович // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 8. – С. 52–55.

109. Пронько, Н.А. Подготовка исходных данных с использованием средств ГИС-анализа при моделировании водно-солевого режима орошаемых земель саратовского Заволжья / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, А.С. Фалькович // Научное обозрение. – 2010. – № 6. – С. 76-82. – EDN NCAXID.

110. Пронько, Н.А. Пути решения проблемы борьбы с деградацией орошаемых земель Саратовской области / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, А.С. Фалькович, С.В. Затицацкий // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2009. – № 4. – С. 32-37.

111. Пронько, Н.А. Способы повышения продуктивности орошаемой темно-каштановой почвы Саратовского Заволжья / Н.А. Пронько, В.В. Корсак, А.А. Кулявцева, Д.В. Чадин, Н.В. Медведев// Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы XVI Национальной конференции с международным участием 2026. – С. 423-428.

112. Пронько, Н.А. Управление орошаемым земледелием на основе использования информационных технологий / Н.А. Пронько, В.В. Корсак // Научная жизнь. – 2012. – № 2. – С. 80–87.

113. Рогачев, А.Ф. Мета-анализ цифровых технологий и методов ИИ для повышения продуктивности орошаемых агрофитоценозов в условиях засушливого климата / А.Ф. Рогачев, К.Е. Токарев // Journal of Agriculture and Environment. – 2025. – № 11(63). – DOI 10.60797/JAE.2025.63.12. – EDN WRLNQC.

114. Рогачев, А.Ф. Обоснование математических моделей как алгоритмической основы цифровых двойников водохозяйственных предприятий / А.Ф. Рогачев, Д.А. Рогачев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – № 3(81). – С. 455-463. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-03-51. – EDN TRSTKC.

115. Рогачев, Д.А. Взаимосвязь водного индекса NDWI и гидротермического коэффициента Селянинова при оценке мелиоративного состояния почв в условиях сухостепной зоны / Д.А. Рогачев, А.Ф. Рогачев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – № 6(84). – С. 219-226. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-06-24. – EDN FQKLDQ.

116. Рогачев, Д.А. Цифровая трансформация управления техническим состоянием оросительной системы / Д.А. Рогачев // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2025. – № 2. – С. 60-68. – DOI 10.31857/S2500208225020132. – EDN HVEQTV.

117. Рожков, В.А. Первые цифровые карты показателей биологической продуктивности / В.А. Рожков, А.З. Швиденко // Почвоведение. – 2010. – № 11. – С. 1296-1304. – EDN NBSNOF.

118. Рожков, В.А. Почвенная информатика / В.А. Рожков; ВАСХНИЛ, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. — Москва: Агропромиздат, 1989. — 219 с. — ISBN 5-10-000300-6.

119. Рожков, В.А. Становление почвенной информатики / В.А. Рожков // Почвоведение. – 2002. – № 7. – С. 858-866. – EDN SIWMKT.

120. Рунов, Б.А. Основы технологии точного земледелия. Зарубежный и отечественный опыт / Б.А. Рунов, Н.В. Пильникова. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: АФИ, 2012. – 120 с.

121. Сафонова, Т.В. Применение математической модели потери влаги культурой и почвой в цифровых двойниках (ЦД) агропромышленных объектов / Т.В. Сафонова, О.Н. Колбина, Н.В. Яготинцева [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 11(137). – DOI 10.23670/IRJ.2023.137.154. – EDN LMRMSX.

122. Соловьев, Д.А. Цифровые технологии оптимизации параметров увлажнения расчетного слоя почвы / Д.А. Соловьев, В.В. Корсак, Г.Н. Камышова [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 1. – С. 86–89. – DOI 10.28983/asj.y2021i1pp86-89. – EDN COVGJC.

123. Сосфенов, Д.А. Применение технологии цифровых двойников в России: возможности развития и сдерживающие факторы / Д.А. Сосфенов, М.С. Шахова // Экономика и управление. – 2023. – Т. 29, № 11. – С. 1325–1332. – DOI 10.35854/1998-1627-2023-11-1325-1332.

124. Сычев, В.Г., Возможности дистанционной диагностики минерального питания растений /, Р.А. Афанасьев, Г.А. Кирсанов [и др.] // Плодородие. – 2020. – № 2(113). – С. 13-17. – DOI 10.25680/S19948603.2020.113.04. – EDN DQHWDK.

125. Сычев, В.Г. Методика отбора почвенных проб по элементарным участкам поля в целях дифференцированного применения удобрений / В.Г.

Сычев, Р. А.Афанасьев, Г.И. Личман, М.Н. Марченко; Российская академия сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (ГНУ ВНИИА). – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2007. – 36 с. – EDN SKCGIZ.

126. Сычев, В.Г. Цифровизация агрохимического обслуживания земледелия / В.Г. Сычев, Р.А. Афанасьев, Г.Е. Мерзлая // Плодородие почв России: состояние, тенденции и прогноз: Материалы международной конференции (К 100-летию со дня рождения академика ВАСХНИЛ Тамары Никандровны Кулаковской), Москва, 26–27 ноября 2019 года / Под редакцией В.Г. Сычева. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2019. – С. 330-337. – DOI 10.25680/VNIIA.2019.33.16.081. – EDN FOLUWW.

127. Тарбаев, В.А. Мониторинг состояния почв Саратовского Заволжья / В.А. Тарбаев, А.Г. Исаков // Правовые, экономические и экологические аспекты рационального использования земельных ресурсов: Сборник статей X Международной научно-практической конференции, Саратов, 19–20 июня 2025 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова, 2025. – С. 92-96. – EDN KUSLZG.

128. Терлеев, В.В., Математическое моделирование водоудерживающей способности почвы с учетом гистерезиса для расчета прецизионных норм орошения / В.В. Терлеев, А.Г. Топаж, Е.А. Дунаева [и др.] // Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы: сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Анатолия Даниловича Воронина, Москва, 27–30 мая 2019 года. – Москва: ООО "Издательский дом КДУ", 2019. – С. 344-348. – EDN TPWFPG.

129. Терлеев, В.В., Расчет прецизионных норм орошения сельскохозяйственных культур с применением метода математического

моделирования / В.В. Терлеев, В.А. Лазарев, К.Г. Моисеев, Е.А. Дунаева // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего: Материалы IV Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 13–15 сентября 2023 года. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2023. – С. 617-625. – EDN NYBEZI.

130. Токарев, К.Е. Проблемы оперативного мониторинга орошаемых агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия с использованием алгоритмов ИИ / К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев, А.Ю. Попов [и др.] // Journal of Agriculture and Environment. – 2025. – № 10(62). – DOI 10.60797/JAE.2025.62.9. – EDN NRRJQK.

131. Усов, Н.И. Почвы Саратовской области. Часть 2: Левобережье / Н.И. Усов. – Саратов: ОГИЗ Саратовское областное, 1948. – 363 с.

132. Фалькович, А.С. Алгоритм определения типа засоления почвы по анионному составу для сухостепного Заволжья / А.С. Фалькович, В.В. Корсак, Л.Г. Романова, Д.А. Курмангалиева // Вавиловские чтения - 2016: сборник статей международной научно-практической конференции, посвященной 129-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова, Саратов, 24–25 ноября 2016 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2016. – С. 184-187. – EDN XCGQNJ.

133. Фалькович, А.С. Значения гидрофизических параметров для моделирования влагопереноса в террасовых темно-каштановых почвах Нижнего Поволжья / А.С. Фалькович // Научное обозрение. – 2011. – № 3. – С. 13–17. – EDN OKMEIL.

134. Фалькович, А.С. Моделирование солевого режима темно-каштановых почв / А.С. Фалькович, Н.А. Пронько // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2009. – № 5. – С. 43-46. – EDN KDNLVV.

135. Фалькович, А.С. Перспективные приемы мелиорации в борьбе с деградацией орошаемых земель (на примере Саратовской области) / А.С. Фалькович, Н.А. Пронько, В.В. Корсак // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 1(25). – EDN YGJXFV.

136. Фалькович, А.С. Прогноз водно-солевого режима почвогрунтов в системе проектирования и мониторинга объектов мелиорации / А.С. Фалькович, Н.А. Пронько // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2010. – № 10. – С. 62-69. – EDN MVRZLN.

137. Фисенко, Б.В. Разработка программы расчета поливных норм по доступным влагозапасам / Б.В. Фисенко, О.В. Михеева, И.А. Михеев // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 9. – С. 139–143. – DOI 10.28983/asj.y2023i9pp139-143. – EDN NLVEXS.

138. Фисенко, Б.В. Совершенствование методов инженерно-гидрометеорологических изысканий путем применения цифровых моделей рельефа / Б.В. Фисенко, Т.А. Борушина, А.С. Воронцов // Аграрные конференции. – 2019. – № 1(13). – С. 7–11. – EDN YZAQEX.

139. Фисенко, Б.В. Цифровые модели рельефа – основа для реализации технологий точного земледелия (на примере территории УНПО «Поволжье» Саратовского ГАУ им. Н. И. Вавилова) / Б.В. Фисенко, В.В. Корсак, И.И. Демакина // Управление объектами недвижимости и развитием территорий: сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. (Саратов, 22 декабря 2021 г.). – Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2021. – С. 90–95. – EDN QYKDHS.

140. Чиж, Д.А. Создание электронных карт для целей точного земледелия на основе локальной ЗИС административного района / Д.А. Чиж // Информационные технологии, системы и приборы в АПК: материалы 4-ой Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 14–15 октября 2009 года / Редколлегия: Савченко О.Ф., Бычкова Т.В., Митьковская И.Ф., Кубрина О.С., Ёлкин О.В., Ольшевский С.Н., Гурова Т.А. Том Часть 1. –

Новосибирск: Сибирский физико-технический институт аграрных проблем, 2009. – С. 227-230. – EDN RWKHMB.

141. Чураев, А.А. Прецизионное орошение и современные средства для его реализации / А.А. Чураев, Л.В. Юченко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2016. – № 2(62). – С. 75-79. – EDN WBMPZT.

142. Шадских, В.А. Динамика агрофизических свойств длительно орошаемых почв Поволжья / В.А. Шадских, В.Е. Кижаяева // Орошаемое земледелие - основа устойчивого и достаточного производства продовольствия: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия, Волгоград, 24–26 августа 2022 года. – Волгоград: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия", 2023. – С. 181-191. – EDN NXZSTT.

143. Шадских, В.А. Изменение плодородия и гумусового состояния темно-каштановых длительно орошаемых почв при различных агротехнических приемах / В.А. Шадских, В.Е. Кижаяева // Мелиорация и водное хозяйство. – 2022. – № 2. – С. 7–10. – DOI 10.32962/0235-2524-2022-2-7-11. – EDN JBPIYQ.

144. Шадских, В.А. Почвозащитная основная обработка орошаемых темно-каштановых почв сухостепного Заволжья / В.А. Шадских, В.Е. Кижаяева // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования: материалы юбил. междунар. науч.-практ. конф. (Костяковские чтения). – М., 2007.

145. Шадских, В.А. Прогноз изменения агрофизических характеристик почв Поволжья под влиянием длительного орошения / В.А. Шадских, В.Е. Кижаяева // Орошаемое земледелие. – 2022. – № 3(38). – С. 56-61. – DOI 10.35809/2618-8279-2022-3-12. – EDN NTXKQK.

146. Шадских, В.А. Эколого-мелиоративные аспекты использования орошаемых земель Саратовской области / В.А. Шадских, В.Е. Кижеева, Л.Г. Романова // Экология и строительство. – 2020. – № 2. – С. 54–60. – DOI 10.35688/2413-8452-2020-02-008.

147. Шевченко, В.А. Моделирование природно-техногенных процессов в мелиоративно-водохозяйственном комплексе / В.А. Шевченко, Г.И. Бондарева, Э.Б. Дедова [и др.]. – Москва: ФНЦ гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, 2025. – 231 с. – ISBN 978-5-907464-75-9. – DOI 10.37738/VNIIGIM.2025.48.97.001. – EDN VFODYW.

148. Щедрин, В.Н. Оптимизация состава приборного обеспечения контроля агрометеопараметров как этап разработки технологии прецизионного орошения / В.Н. Щедрин, С.М. Васильев, А.А. Чураев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 3(23). – С. 1-18. – EDN WHGGGR.

149. Щедрин, В.Н. Подходы к формированию информационной системы «Цифровая мелиорация» / В.Н. Щедрин, С.М. Васильев, В.В. Слабунов, А.В. Слабунова, А.А. Завалин // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2020. – Вып. 1. – С. 53–64. – DOI 10.14357/20718632200106.

150. Щуклина, О.А. Эффективность дифференцированного применения азотных удобрений в качестве корневых подкормок на основе NDVI / Р.А. Афанасьев, Н.Н. Лангаева, С.В. Завгородний // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35, № 8. – С. 20-24. – DOI 10.53859/02352451_2021_35_8_20. – EDN XMXITW.

151. Эшпулатов, Д.Б. Цифровые двойники в сельском хозяйстве: анализ основных тенденций / Д.Б. Эшпулатов // Raqamli iqtisodiyot ilmiy-elektron jurnali. – 2023. – № 2. – С. 41–54.

152. Юрченко, И.Ф. Опыт компьютерного моделирования управленческих решений в мелиорации / И.Ф. Юрченко // Известия

Оренбургского государственного аграрного университета. – 2004. – № 2(2). – С. 30–32. – EDN MWANUR.

153. Юрченко, И.Ф. Перспективные технологии инновационного орошения / И.Ф. Юрченко // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12, № 4. – DOI 10.31774/2712-9357-2022-12-4-233-245. – EDN RJPHLN.

154. Юрченко, И.Ф. Перспективы технологий Интернета вещей в агропроизводстве / И.Ф. Юрченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 67–80. – DOI 10.31774/2222-1816-2021-11-1-67-80. – EDN HZESEL.

155. Юрченко, И.Ф. Приоритетные направления и мероприятия современной цифровизации в мелиорации / И.Ф. Юрченко // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 84–100. – DOI 10.31774/2712-9357-2022-12-2-84-100. – EDN KYWLYQ.

156. Юрченко, И.Ф. Цифровизация мелиоративных агротехнологий: возможности, вызовы, перспективы, инновации / И.Ф. Юрченко // Мелиорация и гидротехника. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 141–156. – DOI 10.31774/2712-9357-2021-11-4-141-156. – EDN UMXZBH.

157. Юрченко, И.Ф. Цифровые системы регулирования мелиоративного режима агроэкосистем / И.Ф. Юрченко // International Agricultural Journal. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 21. – DOI 10.24411/2588-0209-2020-10164. – EDN AJVGUG.

158. Якушев, В.П. Информационное обеспечение точного земледелия / В.П. Якушев, В.В. Якушев. – Санкт-Петербург: Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, 2007. – 384 с. – ISBN 5-86763-181-8. – EDN PVPBKH.

159. Якушев, В.П. Оценка технологий точного земледелия: Аналитический обзор / В.П. Якушев, Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, А.Г. Топаж // Агрохимический вестник. – 2002. – № 3. – С. 36-40. – EDN PVPBIT.

160. Якушев, В.П. Роль и задачи точного земледелия в реализации национальной технологической инициативы / В.П. Якушев, В.В. Якушев, Д.А. Матвеев // Агрофизика. – 2017. – № 1. – С. 51–65.
161. Якушев, В.В. Точное земледелие: теория и практика / В.В. Якушев. – Санкт-Петербург: АФИ, 2016. – 364 с. – ISBN 978-5-905200-31-1. – EDN WMGJNR.
162. Якушев, В.П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета "умное сельское хозяйство" России / В.П. Якушев // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2019. – № 2. – С. 11-15. – DOI 10.30850/vrsn/2019/2/11-15. – EDN ZBFLJJ.
163. Янюк, В.М. Оценка и прогноз гумусового состояния орошаемых темно-каштановых почв Заволжья / В.М. Янюк, Л.Г. Романова, П.В. Тарасенко // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 11. – С. 59-63. – DOI 10.28983/asj.y2021i11pp59-63. – EDN PAIDMT.
164. Di Maggio A. Harnessing Digital Twins for Sustainable Agricultural Water Management: A Systematic Review / A. Di Maggio, D. Spadaro, F. Linsalata [et al.] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 8. – Article 4228.
165. Fuller A. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
166. Gao B. C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 58, № 3. — P. 257–266. — DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
167. Jones D. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – Vol. 28. – DOI 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
168. Kamyshova G., Development of Approaches to the Intellectualization of Irrigation Control Systems / G. Kamyshova, D. Solovyev, N. Terekhova, D.

Kolganov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 245. – P. 359-369. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_30. – EDN TNHBEA.

169. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digitalization of agriculture: An overview of the literature, challenges and future directions // NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences. — 2019. — Vol. 90–91. — Article 100315. — DOI: 10.1016/j.njas.2019.100315.

170. Kritzinger W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, № 11. – P. 1016–1022. – DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

171. Lu Y., Liu C., Wang K. I.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2020. — Vol. 61. — Article 101837. — DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.

172. McBratney A., Whelan B., Ancev T., Bouma J. Future directions of precision agriculture // Precision Agriculture. — 2005. — Vol. 6. — P. 7–23. — DOI: 10.1007/s11119-005-0681-8.

173. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems Engineering. — 2013. — Vol. 114, № 4. — P. 358–371. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.

174. Oliver M. Precision Agriculture for Sustainability and Environmental Protection / M. Oliver. – London: Routledge, 2013. – 304 p. – DOI 10.4324/9780203128329.

175. Papageorgas P. Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review / P. Papageorgas [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 16. – Art. 7128. – DOI 10.3390/s23167128

176. Pylianidis C. Introducing digital twins to agriculture / C. Pylianidis, S. Osinga, I. N. Athanasiadis // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 184. – Article 105942. – DOI 10.1016/j.compag.2020.105942.

177. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management // *Agronomy*. — 2020. — Vol. 10, № 2. — Article 207. — DOI: 10.3390/agronomy10020207.

178. Shchuklina O., Differentiated application of nitrogen fertilizers based on optical sensor readings / O. Shchuklina, I. Voronchikhina, I. Klimenkova [et al.] // *Agronomy Research*. — 2021. — Vol. 19, No. 2. — P. 595-600. — DOI 10.15159/AR.21.093. — EDN NSFCNQ.

179. Subeesh A., Naveen Chauhan, Agricultural digital twin for smart farming: a review // *Green and Smart Technologies*. — 2025. — № 100299. — DOI 10.1016/j.grets.2025.100299.

180. Vasilyev S. M. Applying the Precision Irrigation Technology to Address the Deficit of Water Resources in the South of Russia / S. M. Vasilyev, A. N. Babichev, V. I. Olgarenko // *The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems* / ed. by A. V. Bogoviz. — Heidelberg: Springer, 2021. — P. 789–795. — DOI 10.1007/978-3-030-72110-7_86. — EDN MSZBWQ.

181. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming — A review // *Agricultural Systems*. — 2017. — Vol. 153. — P. 69–80. — DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.

182. Xing Y., Wang X. Precision water and fertilizer application technologies: a review // *Environmental Modelling & Software*. — 2025. — Vol. 106288. — DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106288.

183. Zhang N., Wang M., Wang N. Precision agriculture — a worldwide overview // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2002. — Vol. 36, № 2–3. — P. 113–132. — DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00096-0.

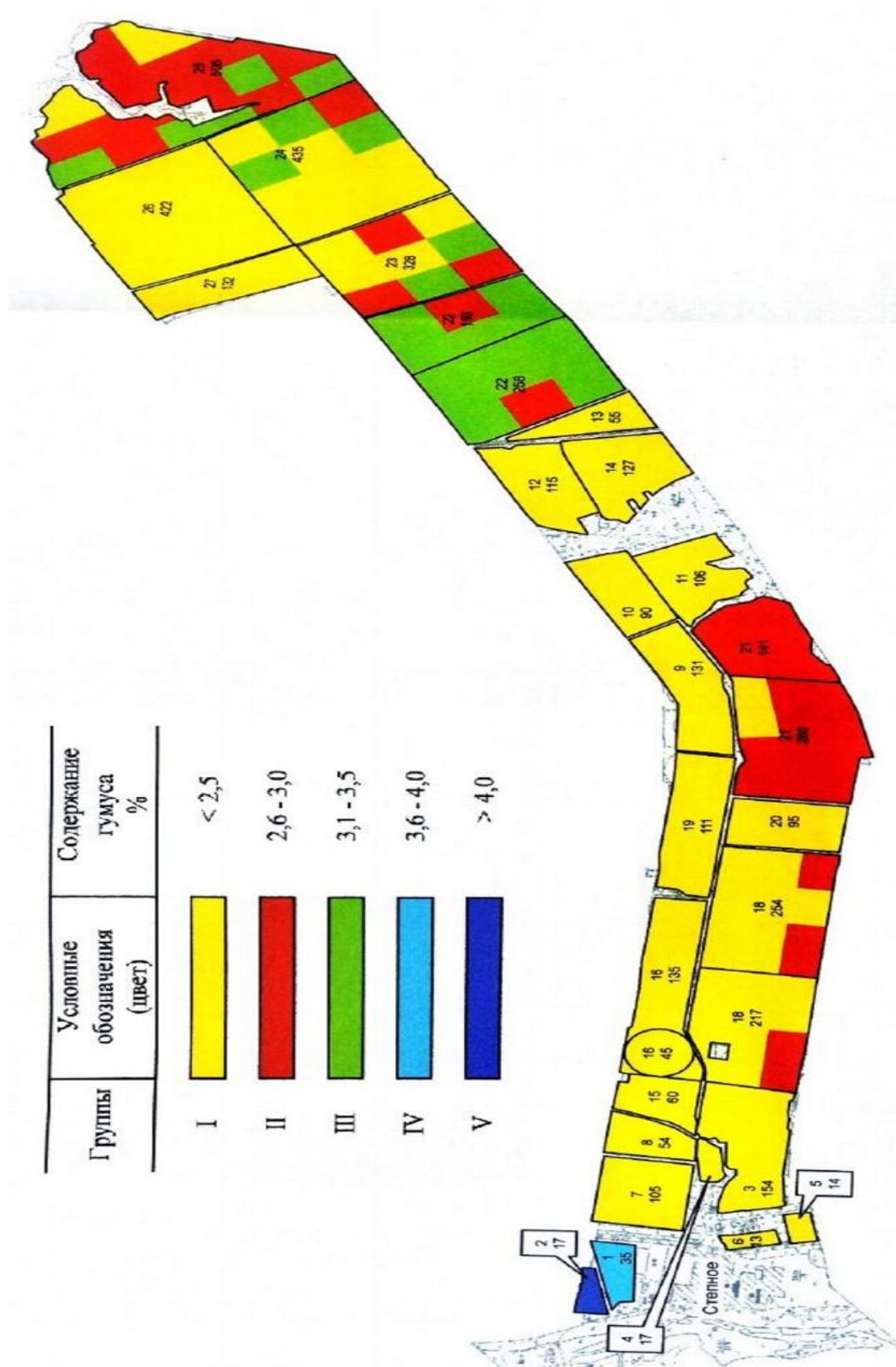
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Картограммы распределения основных элементов питания в почвах
УНПО «Поволжье» Энгельсского района Саратовской области**

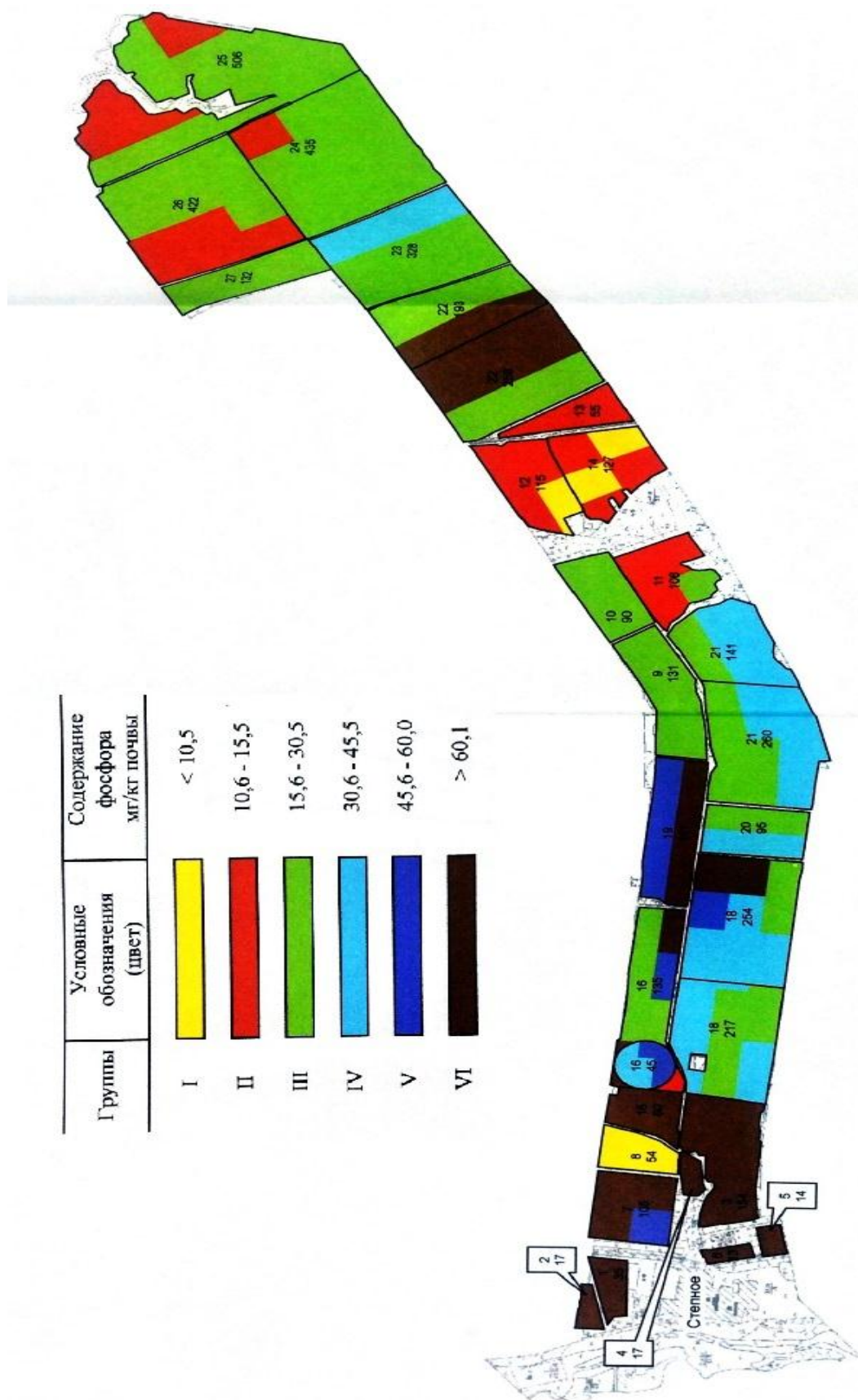
Приложение А 1

Агрохимическая картограмма содержания гумуса в почвах



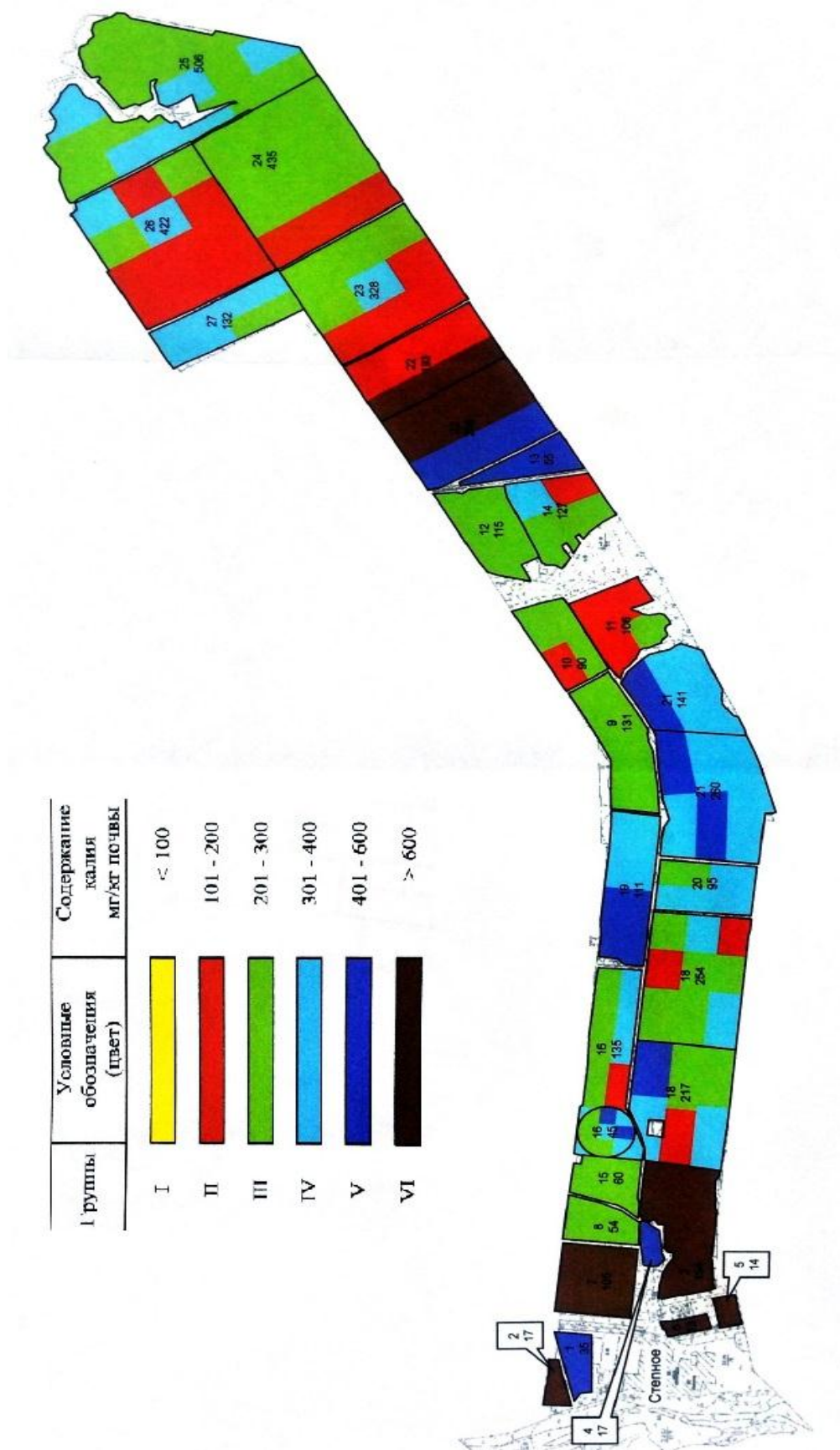
Приложение А 2

Агрохимическая картограмма содержания доступного фосфора в почвах



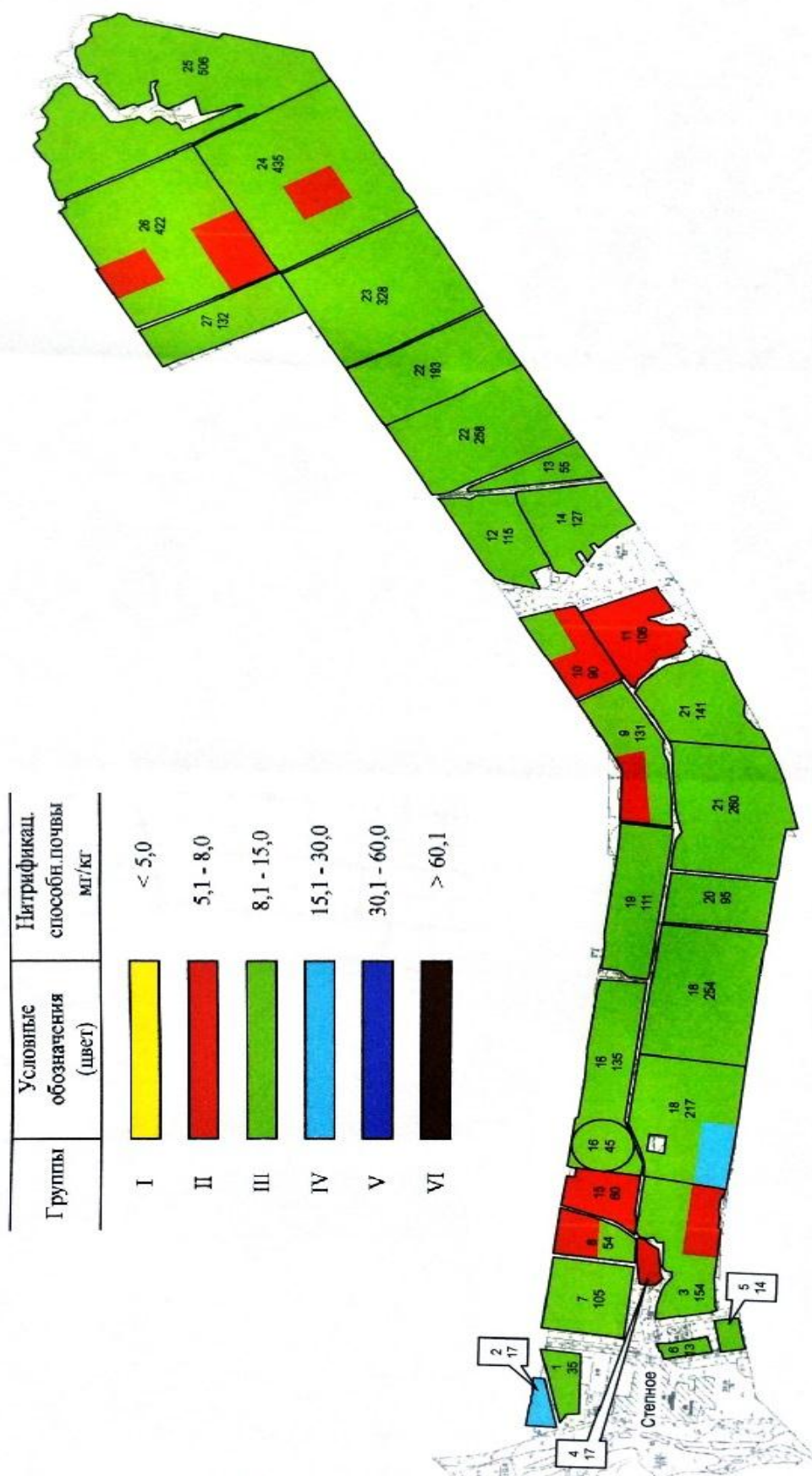
Приложение А 3

Агрохимическая картограмма содержания обменного калия в почвах



Приложение А 4

Агрохимическая картограмма нитрификационной способности почв



ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Акты внедрения

Приложение Б 1

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
инновационной работе ФГБОУ ВО

Вавиловский университет

К. Е. Денисов

« 9 » сентября 2025 г.**АКТ ВНЕДРЕНИЯ****результатов научных исследований в производство**

Дан, Медведеву Николаю Викторовичу, аспиранту кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» ФГБОУ ВО «Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова», в том что результаты научно-исследовательской работы (диссертации) на тему: «Технология управления орошаемым полем на основе использования цифрового двойника для условий сухостепного Заволжья» внедрены в УНПО «Поволжье» Энгельсского района Саратовской области, путем применения технологий цифрового двойника орошаемого поля на опытном участке 60 га при расчете поливных норм.

Использование компьютерных программ цифрового двойника орошаемого поля, позволило сократить расход оросительной воды на 20%, с экономическим эффектом 7,0 тысяч рублей с 1 гектара.

Технологии цифрового двойника орошаемого поля, стоит рекомендовать к внедрению хозяйствам занимающимся возделыванием сельскохозяйственных культур при орошении.

Директор УНПО «Поволжье»
с. Степное, Энгельсского района,
Саратовской области

Тел.: (8452) 27-37-35

E-mail: unpo.sgau@mail.ru

А. В. Хадыкин

АКТ ВНЕДРЕНИЯ от 15.05.2026 г.

1. Наименование организации и объекта, где внедрено мероприятие:
опытно-производственное хозяйство «ВолжНИИГиМ» филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации» Энгельсского района, Саратовской области.
2. Тема работы, наименование мероприятия внедрения:
«Технология управления орошаемым полем на основе использования цифрового двойника для условий сухостепного Заволжья».
3. Наименование организации, проводящей научную разработку и опытное освоение внедряемого мероприятия:
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»
Руководитель работы – доктор сельскохозяйственных наук, доцент Корсак Виктор Владиславович, исполнитель – Медведев Николай Викторович.
4. Срок внедрения мероприятия 2026 год.
5. Краткая характеристика и новизна внедряемого мероприятия:
Технология цифрового двойника орошаемого поля
Преимущества разработанной технологии управления водным и пищевым режимом орошаемого поля:
 - разработанная технология адаптирована к природно-климатическим, водно-физическим, агрохимическим условиям произрастания поливных культур на землях Саратовского Заволжья.
 - применение компьютерных программ использования информации цифрового двойника, позволило выделить зоны для дифференцированного внесения удобрений с учетом распределения содержания основных элементов питания по площади орошаемого поля, сократить расход поливной воды на 20%.Применение технологии управления орошаемым полем на основе использования цифрового двойника позволяет значительно повысить эффективность использования орошаемых земель, сократить затраты на агротехнические мероприятия.

Врио директора

ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»



Ю. А. Гопкалов

Директор ОПХ «ВолжНИИГиМ»



Д.Г. Кайбалиев

Приложение Б 3

«УТВЕРЖДАЮ»
 Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет
 им. Н. И. Вавилова»
 С. А. Макаров

«10» _____ 20__ г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы (диссертации) Медведева Николая Викторовича в учебный процесс кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» Института инженерии и робототехники ФГБОУ ВО «Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова»

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные разработки, результаты, выводы и рекомендации кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.1.5 «Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика», на тему «Технология управления орошаемым полем на основе использования цифрового двойника для условий сухостепного Заволжья» внедрены в учебный процесс кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» при изучении дисциплин в рамках реализации направления подготовки бакалавров 35.03.11 «Гидромелиорация»: «Технологии возделывания сельскохозяйственных культур на орошаемых землях», «Ресурсосберегающие технологии в орошении», «Специальные виды мелиораций на орошаемых землях», магистров направления подготовки 35.04.11 «Гидромелиорация»: «Дистанционный мониторинг орошаемых земель», «Управление потенциальным и эффективным плодородием орошаемых земель», «Комплексные мелиорации на орошаемых агроландшафтах».

И.о. заведующего кафедрой

«Гидромелиорация, природообустройство и
 строительство в АПК»

С.С. Елисеев

Директор Института

инженерии и робототехники

С.М. Бакиров