

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (РГГМУ)

На правах рукописи



Сафонова Татьяна Владимировна

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ**

Специальность 1.6.20 – Геоинформатика, картография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики ФГБОУ ВО
«Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

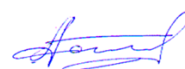
- Научный руководитель:** **Истомин Евгений Петрович,**
доктор технических наук, профессор, директор института Информационных систем и геотехнологий ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»
- Официальные оппоненты:** **Кляхин Валерий Николаевич,**
доктор военных наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
- Орлова Наталья Вячеславовна,**
кандидат технических наук, доцент, администратор УНЦ «ГИС технологии» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»

Защита диссертации состоится «19» марта 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, дом 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.365.01
доктор технических наук (д.т.н.)



Соколов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Глобальное развитие агропромышленного комплекса, а также намерение занять ведущие позиции на внешнеполитической арене вызвано интенсивным распространением цифровых технологий для выполнения сложных задач по развитию агропромышленного комплекса Российской Федерации. Результатом воздействия цифровой трансформации на аграрный сектор стало масштабное изменение методов работы в отрасли, что наблюдается уже сейчас посредством использования таких технологий как: робототехническое земледелие, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), механизированное удаление сорняков, внесение удобрений, а также сбор фруктов. В особенности стоит отметить область точного земледелия, которая формируется посредством использования почвенных карт, спутников, БПЛА, а также технологии интернета вещей. Масштабное внедрение новейших технологий дает возможность увеличить объемы производимых продуктов, затрачивая при этом минимальное количество ресурсов и отведенных площадей. Процесс цифровизации агропромышленного комплекса ориентирован на внедрение современных технологий, которые способны в режиме реального времени осуществлять корректные измерения химических, физических, биологических и прочих характеристик природных процессов, которые могут полноценно описать производство продукции в аграрном секторе. Разнообразные данные, которые получены в различных пространственных, временных и производственных структурах агропромышленного комплекса дают возможность организовать цифровые модели ресурсов в отдельности для каждого хозяйства, регионов и, конечно, страны в целом.

С целью организации эффективного проектирования объектов, в том числе динамических, меняющих свои свойства (атрибуты) в объектно-ориентированных геоинформационных системах (ГИС), оптимизации методов проектирования, предоставлению управленческих решений, качественной и безопасной работы агропромышленного комплекса, гидрометеорологической безопасности необходимо максимально корректное и точное прогнозирование климатических параметров для выявления влияния на динамические объекты, что обязывает выполнять регулярный мониторинг погоды, а именно: измерение климатических показателей и динамики их колебания на контролируемых территориях агропромышленного комплекса. Геоданные мониторинга являются базой пространственных и пространственно-временных данных для осуществления оценки экстремальных ситуаций гидрометеорологических факторов для выявления показателей окружающей среды, формированию алгоритмов действий, а также цифровизации агропромышленного комплекса.

Для осуществления анализа и прогнозирования опасных явлений на глобальном и региональном уровнях требуется изучение гидрометеорологических процессов. Диссертация посвящена вопросам разработки нового подхода к проектированию геоинформационной системы поддержки принятых решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС в интересах обеспечения безопасности деятельности на территориях агропромышленного комплекса.

Отметим, что в настоящее время существуют требования, которые предъявляются к экспертным системам, но не рассматриваются задачи их практической реализации в

условиях ограниченного массива гидрометеорологических параметров на больших территориях.

На сегодняшний день не изучена проблема реализации проектирования и обработки данных геоинформационной системы поддержки принятия решений на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС для объектов агропромышленного комплекса. Главным образом исследуются вопросы проектирования и обработки данных объектов ГИС, которые не меняют свои свойства и поведение в пространстве и времени.

Гидрометеорологическим данным свойственна существенная пространственно-временная динамика, а в результате ограниченности ресурсов по сбору данных на территориях агропромышленного комплекса, экспертная оценка проводится весьма субъективно (точечно), что приводит к формированию некачественного прогноза и уменьшению показателя эффективности функционирования отрасли аграрного сектора. Качественная организация деятельности отрасли аграрного сектора формируется главным образом на основании погодно-климатических факторов, где контроль осуществляет лицо, принимающее решение (ЛПР), имея все необходимые данные. Имеющиеся методики поддержки принятия метеозависимых решений редко принимают во внимание характерные погодно-климатические условия южных широт Российской Федерации и редко дают возможность на качественном уровне применять данные для формирования адекватных рекомендаций с целью реализации качественной деятельности объектов агропромышленного комплекса.

Задачи, ориентированные на разработку и реализацию единых подходов к решению вопросов проектирования и обработки данных геоинформационной системы поддержки принятия решений на основе объектно-ориентированного подхода в настоящее время находятся на стадии осмысления и выработки адекватных способов преодоления ограничений цифровой эволюции отрасли. Наиболее остро отмеченная проблема фиксируется на отдаленных территориях агропромышленного комплекса Российской Федерации, где нет наблюдательных метеостанций.

С целью проектирования и обработки данных динамических объектов геоинформационных систем, реализованных посредством объектно-ориентированного подхода, принятие управленческих решений на основании гидрометеорологических данных имеет важную роль. Для формирования практических рекомендаций необходимо точное моделирование динамического поведения климатических показателей объектов, что позволит провести качественный анализ данных динамических объектов. В частности работа направлена на изучение территорий агропромышленного комплекса, где отсутствует регулярное получение гидрометеорологических данных. На основании имеющихся необходимых сведений о времени наступления опасного явления ЛПР может своевременно принять управленческое решение. **Вследствие этого актуальной является научная задача разработки моделей и методики проектирования и обработки данных геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС на примере агропромышленного комплекса.**

Цель диссертационной работы – повышение эффективности принятия решений в геоинформационной системе на основе объектной базы знаний для агропромышленного комплекса.

Объект исследования – объектно-ориентированная геоинформационная система поддержки принятия решений.

Предмет исследования – технология проектирования объектно-ориентированной геоинформационной системы.

Для выполнения поставленных целей в диссертационной работе решались **основные задачи**:

1. Анализ современных подходов проектирования геоинформационных систем с целью формирования моделей и методики проектирования и обработки данных динамического объекта объектно-ориентированной геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления агропромышленным комплексом.
2. Разработка требований к геоинформационной системе поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования геоинформационных систем.
3. Разработка модели прогнозирования суммарной потери влаги из почвы и листьев с целью формирования геоданных.
4. Разработка модели и методики оценки вероятности наступления опасного явления для агропромышленного комплекса.
5. Разработка практических рекомендаций по использованию полученных моделей и методики в геоинформационной системе поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС для агропромышленного комплекса.

Методы исследования. Решение сформулированной в диссертационной работе научной задачи основано на методах системного анализа, теории вероятности, математической статистики, методах численного анализа, а также математического моделирования.

Научная новизна. Разработаны требования к геоинформационным системам поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС, реализующей отображение динамических объектов, содержащих пространственные и пространственно-временные данные по территориям агропромышленного комплекса. Впервые посредством использования уравнения Пенмана-Монтейна разработан новый метод прогнозирования суммарной потери влаги из листьев и почвы с учетом гидрометеорологических данных и системы сбора геоданных, с целью расчета пространственно-временной изменчивости характеристик динамического объекта. Впервые применена модель и методика оценки вероятности наступления опасного явления на основе параметрической вероятностной модели с использованием геоданных гидрометеорологического моделирования. Разработаны практические рекомендации по применению полученных моделей и методики в геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода к проектированию ГИС.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Требования к геоинформационной системе поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования геоинформационных систем, которые *отличаются* тем, что впервые используют понятие динамического объекта в геоинформационных системах поддержки принятия решений для аграрного сектора, содержащих пространственные и

пространственно-временные данные, что *позволяет* решить проблему обеспечения геоданными на больших территориях агропромышленного комплекса и сформировать требования к проектированию геоинформационных систем поддержки принятия решений для управления объектами в аграрном секторе, а также требования к моделям и методике.

2. Модель прогнозирования суммарной потери влаги из почвы на территориях агропромышленного комплекса для сбора пространственных и пространственно-временных данных, которая *отличается* тем, что в ней впервые представлена модель суммарной потери влаги из листьев и почвы на основе уравнений эталонной эвапотранспирации Пенмана-Монтейна, что *позволит* обеспечить точность краткосрочных прогнозов до 95%.

3. Модель и методика оценки вероятности наступления опасного явления для объектов агропромышленного комплекса, которая *отличается* тем, что формируется на базе геоданных посредством применения параметрической вероятностной модели, а также выявления времени наступления опасного явления, учитывая наличие начальных значений, что *позволяет* увеличить достоверность оценки риска, на основе оказанного воздействия климатических показателей с точностью до 90%.

4. Практические рекомендации по применению полученных моделей и методики в геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода к проектированию ГИС для территорий агропромышленного комплекса. Рекомендации *отличаются* тем, что используются разработанные модели методика проектирования и анализа данных динамических объектов для территорий агропромышленного комплекса, что *позволяет* обеспечить геопространственное отображение данных для поддержки принятия решений лицами, принимающими решения.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствует паспорту специальности 1.6.20 – «Геоинформатика, картография» пунктам: 4, 5, 6, 7, 8.

Практическая и научная ценность работы заключается в решении научно-технической проблемы, связанной с управлением динамическими объектами в агропромышленном комплексе, путем использования разработанных моделей и методики проектирования и обработки данных для управления динамическими объектами в объектно-ориентированных геоинформационных системах.

Практическая значимость представленных результатов заключается в разработке методических подходов к проектированию, обработке и анализу пространственных и пространственно-временных данных, ориентированных на управление динамическими объектами на территориях агропромышленного комплекса, т. е. на учет гидрометеорологических условий, что позволит увеличить урожайность зерновых культур, уменьшая риски в труднодоступных районах, тем самым увеличивая продуктивность агропромышленного комплекса.

Практическая значимость представленных результатов исследований диссертационной работы подтверждается реализацией полученных результатов в НИР ГЗ «Климат» № FSZU-20200009 от 31.08.2020 г., НИР ГЗ «Климат» №FSZU-2023-0002 от 01.01.2023 г., НИР №НИИ20 от 14.10.2022 г., НИОКР № 34/1 от 28.04.2023 г. и в учебном процессе в рамках дисциплины «Управление геоинформационными системами», что подтверждено актами о внедрении результатов диссертационной работы.

Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2021619840 «Геоинформационная система моделирования волновых процессов в закрытой акватории (бухте)», №2023687238 «Оценка риска наступления опасного гидрометеорологического явления на основе параметрической вероятностной модели»; свидетельство о государственной регистрации для баз данных №2023624598 «База данных элементов системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами агропромышленного».

Достоверность полученных результатов. Разработанные модели прошли тестирование посредством реализации серии численных экспериментов для случаев различных показателей суммарной потери влаги из почвы и листьев для динамических объектов агропромышленного комплекса. Полученные результаты численного моделирования сопоставлялись с данными натурных наблюдений.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались и были обсуждены на Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Российский государственный гидрометеорологический университет, Институт информационных систем и геотехнологий, Санкт-Петербург, 2020, 2022), научно-технической конференции-вебинаре «Цифровые технологии в лесном секторе» (СПБЛТУ, 2022), 2ND ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE ON DIGITAL TECHNOLOGIES IN FOREST SECTOR (Saint Petersburg, Russian Federation, 2021), научно-технической конференции-вебинаре «Цифровые технологии в лесном секторе» (СПБЛТУ, 2022) 6TH ALL-RUSSIAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CONFERENCE FORESTS OF RUSSIA: POLITICS, INDUSTRY, SCIENCE, EDUCATION (Saint Petersburg, Russian Federation, 2021), НИР ГЗ «Климат» №FSZU-2023-0002 от 01.01.2023 г.

Личный вклад автора. Участие на всех этапах исследований; личное участие в получении исходных данных, разработке методике и моделей, непосредственное участие в апробации полученных результатов, подготовка публикаций по выполненной диссертационной работе.

Публикации. Научные результаты по теме диссертационной работы опубликованы в 10 статьях, из них 6 статей опубликованы в рецензируемых из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, 4 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных (Scopus), 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка используемых сокращений, введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 133 страницы, 60 рисунков, 8 таблиц, 49 формул. Список использованной литературы составляет 105 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность научной работы, определены объект, предмет, цели и задачи исследования, описаны практическая и научная ценность работы, кратко изложено содержание диссертации по главам, представлены основные научные результаты, предлагаемые для защиты.

В **первой главе** проводится анализ состояния и условий развития агропромышленного комплекса, информационного и материально-технического обеспечения производства зерна на территории Российской Федерации. Ориентируясь на современные мировые технологии, позволяющие автоматизировать производственный

процесс, следует подчеркнуть, что их применение позволит улучшить показатели до уровня аграрного сектора развитых стран. Уже сейчас наблюдается активное использование технологий цифровой трансформации.

В результате анализа перспектив развития агропромышленного комплекса было отмечено, что за последние десять лет проводилась масса исследований в области развития, внедрения и эксплуатации цифровых технологий в агропромышленном производстве, которые показали значительную эффективность за счет оптимизированного использования водных и земельных ресурсов. Выявлено существенное увеличение показателей внедрения интернет-технологий, использующих для функционирования спутниковую связь, геопозиционирование, инструменты робототехники, технологии цифровых двойников, а также систем автоматизации производственного процесса.

В исследовании были выделены условия, влияющие на развитие агропромышленного комплекса на территории Российской Федерации. Отмечено направление развития по пути цифровизации и внедрения информационных технологий, что указывает на необходимость внедрения геоинформационных технологий на территориях аграрного сектора, включая территории небольшого масштаба.

Для того, чтобы грамотно спроектировать ГИС необходимо соблюдать последовательность этапов формирования и эксплуатации ГИС, которые отмечены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Стадии этапа создания и эксплуатации ГИС

Источники информации, процедуры ее получения, а также методы анализа требуют формирования этапов целого технологического процесса, который аккумулирует согласованность целей и задач ГИС. Поэтому в качестве базы для проектирования и разработки ГИС выделена общая методология. Геоинформационная технология определена в роли средства машинного представления данных и знаний о Земле, требуется определить направленность построения основного инструмента познания закономерностей структуры и разработки геосистем, которое выполняется за счет ресурсов информатики, ориентированной на математическое моделирование и машинную графику.

На основании анализа инструментов проектирования моделей данных геоинформационных систем было выявлено, что классические методы отображения картографической модели геопространственной информации предназначены для визуального восприятия данных, к сожалению, не отображают внутреннего содержания объектов, что ведет к потере географической информации об объектах, а также к последующему разбиению объектов местности на обособленные элементы (таблица 1). В подобной «классической модели» в обязательном порядке должна реализовываться предварительная подготовка пространственных данных (сшивка, редактирование

значений координатных и атрибутивных представлений, поиск недостающих компонентов объектов на картах иных масштабов, либо производителей и т. д.).

Таблица 1 – Анализ недостатков современных ГИС

Модели данных ГИС	Недостатки моделей
Растровые модели данных	<ul style="list-style-type: none"> · отсутствие корректной информации о местоположении объектов; · увеличение пространственной мерности объектов; · ступенчатость линий; · высокие объемы требуемой машинной памяти; · обязательное отслеживания правильности интерпретации и разрешения многозначности результатов; · малая пространственная точность: некачественное определение длины линий, площадей, направлений и расстояний; · обязательное привлечение дополнительных средств для визуализации взаимосвязей геообъектов; · отсутствие возможности построения топологических структур (моделей), отношений; · отсутствие средств представления графов (сетей).
Векторные модели данных	<ul style="list-style-type: none"> · проблемность выполнения работы с площадными объектами и поверхностями; · сложности с демонстрацией полутонов, мерцания; · некачественная эффективность оверлеев; · поочередная обработка ГИ (код); · пространственные взаимоотношения между объектами (топология) предполагаются, а не фиксируются в компьютер в очевидной форме; · отношения между объектами должны вычисляться; · дополнительная вычислительная нагрузка усложняет измерения и анализ; · допускаются ошибки и многозначности при машинном определении топологии; · нередко требуются экспертные решения.
Модели данных типа TIN	<ul style="list-style-type: none"> · построение и обработка модели данных типа TIN дорогостоящая; · обработка модели данных типа TIN, из-за сложности структуры, менее эффективна, чем обработка растровых данных; · применяется для моделирования небольших областей с очень высокой точностью.
Grid модель данных	<ul style="list-style-type: none"> · регулярная структура данных не подходит для отображения неравномерной поверхности; · базовая структура модели данных Grid не дает возможности корректно продемонстрировать линейные объекты в приложениях, где требуются крупные масштабы.

Классическое представление геопространственных данных несет за собой наличие серьезных ошибок, причем незначительная доработка некоторых недочетов существенно не изменит качество представления картографического материала. На смену данному методу необходима новая объектно-ориентированная модель проектирования и обработки данных ГИС, ориентированная на учет объектов с динамическим поведением.

Объектно-ориентированная геоинформационная система поддержки принятия решений, отличается тем, что впервые использует динамический объект (территорию) в ГИС, который обладает рядом свойств (атрибутов), изменяющихся в пространстве и времени, а также посредством световых индикаторов визуально отображает состояния объекта. Использование геоинформационной системы поддержки принятия решений дает возможность решить проблему обеспечения геоданными на больших территориях агропромышленного комплекса и сформировать требования к геоинформационным системам управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования и обработки данных геоинформационных систем для агропромышленного комплекса, а также требования к моделям и методике.

Также был проведен анализ требований СППР, которые предъявляются к управленческим решениям. Стоит отметить, что они не учитывают характерную специфику отраслевой принадлежности, в частности в них отсутствует возможность исследования объектов с динамическим поведением в зависимости от прогностической информации гидрометеорологической обстановки. Система поддержки принятия решений должна быть ориентирована на логический вывод, который подкреплён определенными фактами из соответствующей отрасли, а именно знаниями, а также эвристическими приемами по работе с данными и знаниями агропромышленного комплекса.

На основании проведенного анализа структур данных и знаний в геоинформационных системах поддержки принятия решений требуется организовать корректное геоинформационное управление динамическими объектами агропромышленного комплекса, вследствие чего были сформированы требования к данной системе:

- структура данных должна работать с данными, распределенными в пространстве и времени, а также осуществлять операции с ними;
- структура знаний должна включать в себя определение понятий, отношений между ними и правила вывода для качественного хранения, обработки и применения знаний в АСУ на примере агропромышленного комплекса;
- геоинформационная система поддержки принятия решений должна формировать практические рекомендации по предоставлению управленческих решений, а также качественной и безопасной работы динамических объектов агропромышленного комплекса;
- организация сетевой структуры геоинформационных систем для пространственно-распределенных объектов;
- осуществление прогностической оценки суммарной потери влаги из почвы и листьев на территориях агропромышленного комплекса;
- геомоделирование, включая формирование прогностических карт для управления динамическими объектами, с целью обеспечения продовольственной безопасности страны;
- возможность синхронизации ГИС с распределёнными базами знаний и пространственно-временными данными в базах данных;
- гибкая настройка компонентов ООГИС.

Объектно-ориентированная модель геопространственных данных является совершенно инновационным способом проектирования и обработки пространственных данных, которая нацелена на информационную поддержку при реализации прикладных задач и процессов моделирования в когнитивных ГИС посредством ориентирования на предельное соответствие картографическому объекту как модели существующего объекта реального мира.

Немало структур заинтересовано в использовании учета динамики объектов, так как это свойство позволяет учитывать негативное влияние со стороны биотических, абиотических и антропогенных факторов и не только. Необходимо отметить, что динамические объекты (территории) обладают рядом изменяющихся свойств (атрибутов), а также характерным поведением, которое меняется в пространстве и времени, а в современных ГИС это никак не учитывается. Благодаря учету этих показателей можно построить достоверный прогноз о возможном состоянии объекта в будущем, либо об

альтернативных путях и сроках их достижения. Реализация динамического объекта дает возможность в перспективе колоссально продвинуться в сфере прогнозирования, посредством учета поведенческих свойств данных объектов.

Научная новизна заключается в том, что сформированы требования к геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования и обработки данных ГИС.

Во **второй главе**, на основе анализа современных моделей прогнозирования урожайности, была разработана модель прогнозирования суммарной потери влаги из почвы и листьев для объектов агропромышленного комплекса.

Для осуществления прогнозирования урожайности в агропромышленном комплексе необходимо отметить влияние природно-климатических условий, а также то, что система земледелия крайне нуждается в оптимальном сочетании различных инструментов мониторинга и управления, которые оказывают благотворное влияние на урожайность культур при корректной эксплуатации.

Ориентируясь на полученный прогноз урожайности по конкретным объектам формируется решение о дифференцированной обработке поля. Также есть возможность провести анализ возможных потерь на основании показателей потенциального урожая на территориях с низкими показателями урожайности.

Модель. Для расчета показателя испарения влаги стоит учитывать процесс суммарной потери влаги из почвы и листьев (эвапотранспирации), который аккумулирует сочетание двух отдельных процессов, в результате которых почва теряет воду посредством испарения, а растения благодаря транспирации.

В области расчетных методов эвапотранспирации популярен метод Пенмана-Монтейта, который утвержден как стандарт оценки суммарной потери влаги из почвы и листьев по климатическим данным FAO 56.

Прогнозируемая эвапотранспирация по модели FAO 56 Пенмана-Монтейна представлена следующим уравнением:

$$ET_t = \frac{0.408\Delta_t(R_{nt} - G_t) + y_t \frac{900}{T_t + 273} u_{2t}(e_{st} - e_{at})}{\Delta_t + y_t(1 + 0.34u_{2t})}$$

Для этого требуются следующие гидрометеорологические данные:

где ET_t – прогнозируемая суммарная потеря влаги из почвы и листьев;

R_{nt} – чистая радиация на культуре;

G_t – плотность теплового потока почвы;

y_t – психометрическая постоянная;

T_t – среднесуточная температура воздуха на высоте;

u_{2t} – скорость ветра на высоте 2 м;

$e_{st} - e_{at}$ – дефицит давления насыщенного пара;

Δ_t – наклон кривой давления пара.

В ходе научных изысканий была построена модель, рассчитывающая показатель суммарной потери влаги из почвы и листьев на основе гидрометеорологических данных, которые характеризуют состояние окружающей среды и могут учитываться при эксплуатации цифрового двойника агропромышленного комплекса.

Апробация модели была произведена из расчета данных в Азовском, Дубовском, зерноградском районах Ростовской области (рис.2). Результат исследования дает возможность выявить зависимости, которые отображают показатель суммарной потери влаги и почвы и листьев на культуре, основываясь на погодных условиях.



Рисунок 2 – Динамика показателя суммарной потери влаги из почвы и листьев в соответствии с погодными условиями

Для разработки прогноза суммарной потери влаги из почвы и листьев будем использовать стандартную для гидрометеорологических рядов структуру, разложив ряд на три составляющие: тренд, циклические колебания и автокорреляционную функцию (АКФ).

Первоначально представим гидрометеорологический ряд и определим наличие значимого тренда (рис.3). По t -критерию Стьюдента линейный тренд значим при уровне значимости 5% и из ряда его нужно удалить.

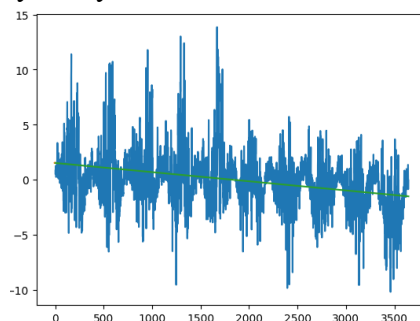


Рисунок 3 – Временной ряд эвапотранспирации с линейным трендом

Удалив тренд, перейдем к оценке гармонических колебаний. Построим периодограмму (рис.4) и определим гармоники с наиболее значимым вкладом в общую дисперсию ряда. Гармоники на периодограмме выше линии уровня значимости 5% значимы по t -критерию Стьюдента.

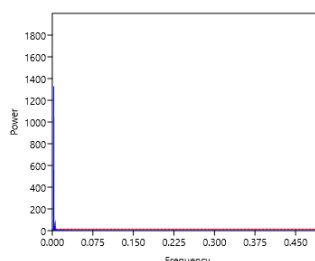


Рисунок 4 – Периодограмма для определения гармоник со значимым вкладом

Далее построен совмещенный график исходного ряда и суммы значимых гармоник (рис.5), далее гармоники из ряда были удалены.

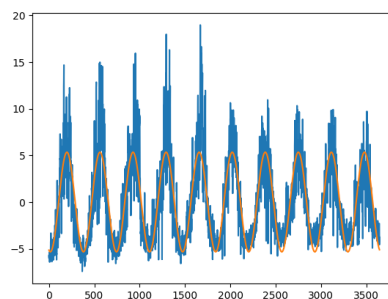


Рисунок 5 – Временной ряд и сумма гармоник

На следующем этапе рассчитана АКФ (рис.6) и авторегрессия 1-го порядка.

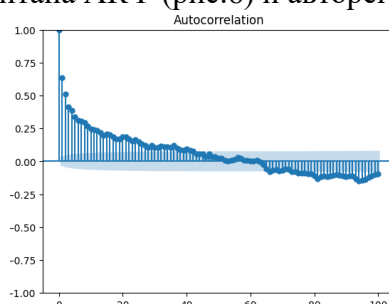


Рисунок 6 – Автокорреляционная функция

Радиус корреляции составляет 50 дней, что говорит об инерционности процесса. Видимая периодичность АКФ отсутствует, но можно предположить, что при увеличении числа сдвигов может присутствовать. Тип процесса – простая цепь Маркова, поэтому можно выполнить прогноз с заблаговременностью от 1 до 40 дней. Выберем наибольший коэффициент корреляции отличный от 0, следовательно заблаговременность 1 день. Авторегрессия 1 порядка с заблаговременностью 1 день (рис.7).

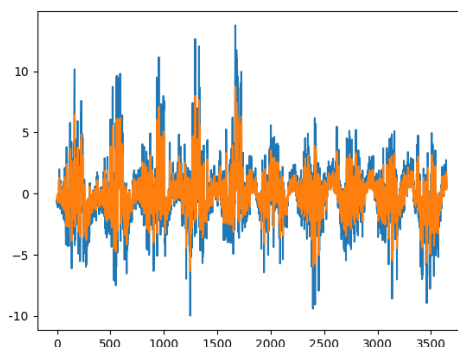


Рисунок 7 – Фактические и прогностические данные с заблаговременностью 1 день

Оценка модели показала, что по t -критерию Стьюдента зависимый коэффициент значим при уровне значимости 5%, коэффициент детерминации составляет 0.4, по критерию Фишера при уровне значимости 5% модель адекватна исходным данным, ошибка модели не превышает стандартное отклонение исходного ряда.

Прогноз с заблаговременностью в 4 дня (рис.8).

Оценка модели показала, что по t -критерию Стьюдента зависимый коэффициент значим при уровне значимости 5%, коэффициент детерминации составляет 0.15, по критерию Фишера при уровне значимости 5% модель адекватна исходным данным, ошибка модели не превышает стандартное отклонение исходного ряда. Модель можно использовать для прогнозирования.

Выводы: данная модель может быть применена для прогнозирования при вводе расчетных параметров, либо для отслеживания состояния сельскохозяйственных культур

при получении непрерывного потока данных с сенсорных датчиков и помощи в принятии решения по уходу за сельскохозяйственными культурами.

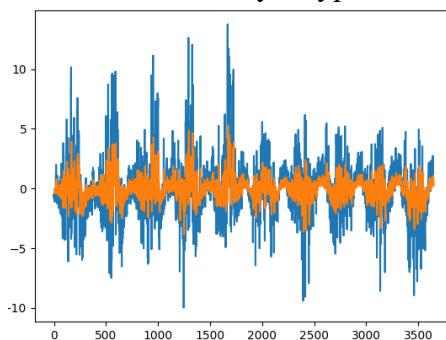


Рисунок 8 – Фактические и прогностические данные с заблаговременностью 4 дня

Далее рассмотрены понятия и проведен анализ методик оценки вероятности наступления опасного явления в природных системах. На основе проведенного анализа было отмечено, что отсутствует оценка вероятности наступления опасного явления для динамических объектов агропромышленного комплекса в зависимости от гидрометеорологических параметров. Вследствие чего разработана модель и методика оценки вероятности наступления опасного явления на основании расчета математического ожидания времени наступления опасного явления на территориях агропромышленного комплекса посредством реализации параметрической вероятностной модели при известных начальных значениях параметров.

Для апробации модели был создан набор геоданных в период с 2013 по 2022 гг. с января по декабрь включительно, который содержит гидрометеорологические параметры по территории Ростовской области по следующим районам: Азовский, Дубовский, Зерноградский.

С целью организации прогнозирования рисков был выбран параметр ET (суммарной потери влаги из листьев и почвы). Данные представлены в качестве последовательности значений ET в последовательные моменты времени. После изучения физического явления становится возможным оценить значение ET в любой заданный момент на основе набора выборочных функций, образующих случайный процесс.

Предположим, что опасное явление произошло, и показатель суммарной потери влаги из почвы и листьев превысил заданный порог (рис.9). Ущерб от критического значения ET пропорционален площади под кривой $ET(t)$ выше уровня $x(крит)$.

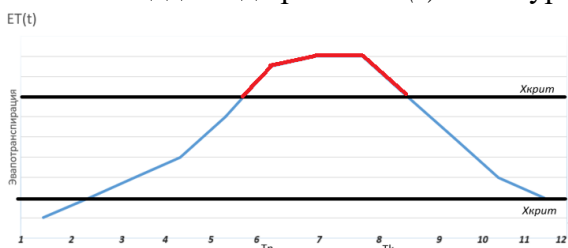


Рисунок 9 – Схема наступления опасного явления при увеличении показателя суммарной потери влаги из почвы и листьев $ET(t)$, где T_n – время начала опасного явления, T_k – время окончания опасного явления

Построение стохастической модели с целью оценки состояния общей потери влаги из почвы и листьев с известными параметрами в начальный момент расчета для определения статистических закономерностей процесса и оценки его вероятностных показателей продемонстрировано на рисунке 10.

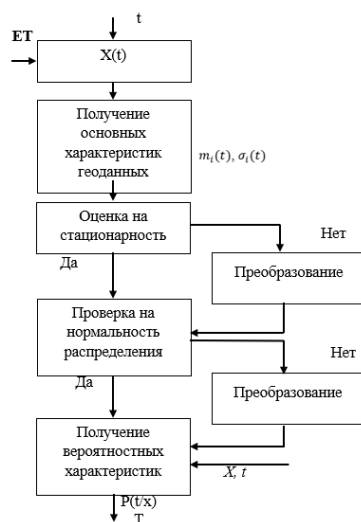


Рисунок 10 – Модель оценки вероятности наступления опасного явления для агропромышленного комплекса с известными параметрами на начальный момент времени
 Данная модель имеет следующие входные данные:

- ET – суммарная потеря влаги из почвы и листьев;
- $X(t)$ – случайная функция времени t и параметров суммарной потери влаги из почвы и листьев;
- t – заданное время для прогнозирования.

Выходные данные модели представлены следующими параметрами:

- $P(t_3 / x_0)$ – вероятность того, что характеристика $X(t)$ не выйдет за заданный предел $x(крит)$;
- \bar{T} – среднее время опасного явления (математическое ожидание времени, в течение которого случайный процесс $x(t)$ находится выше критического уровня).

Модель оценки климатических рисков основывается на использовании математического ожидания времени наступления опасного явления и оценки границ вероятности превышения процессом заданного уровня:

Математическое ожидание

$$m_x(ET_t) = M[ET(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} ET(t)f(ET, t)dx$$

Верхняя граница вероятности превышения процессом заданного уровня

$$\bar{Q}^* = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi(1-r^2(0, t_3)) \int_0^t \left| w\left(\frac{t}{ET_0}\right) \right| dt}} \right)$$

Нижняя граница вероятности превышения процессом заданного уровня

$$\underline{Q}^* = \left(1 - \left[\Phi \left\{ \frac{b - m_x(ET_t) - r_{ET}(0, t_3)[ET_0 - m_x(ET_t)]}{\sigma_{ET}\sqrt{1 - r_{ET}^2(0, t_3)}} \right\} \right] - \Phi \left\{ \frac{-m_x(ET_t) - r_{ET}(0, t_3)[ET_0 - m_x(ET_t)]}{\sigma_{ET}\sqrt{1 - r_{ET}^2(0, t_3)}} \right\} \right)$$

где $m_x(ET_t)$ – математическое ожидание случайного процесса;

σ_{ET} – среднеквадратическое отклонение;

$r_{ET}(0, t_3)$ – автокорреляционная функция;

$w(t/ET_0)$ – плотность распределения времени невыхода за пределы установленных границ $\alpha(t)$ и $\beta(t)$.

На основе изученного материала автором была проанализирована климатическая изменчивость, а также природно-климатические риски, которые представляют собой одни из самых масштабных угроз для популяции всего мира. Это дало возможность разработать методологию оценки и управления рисками с целью обеспечения безопасности динамических объектов агропромышленного комплекса. В процессе разработки геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами это позволит проводить оценку природно-климатических рисков.

Для большинства таких методов, как этот, ключевым требованием является стационарность анализируемого ряда. Это включает среднее значение и дисперсию. Таким образом, на первом этапе анализа данных проверяется стационарность. Еще одним существенным условием является соответствие ряду параметров, включая нормальное распределение.

Результаты моделирования соответствуют физическим законам. При анализе исследовательских работ и натурных наблюдений в близлежащих районах не обнаружено значительных различий между модельными результатами, что подтверждает возможность использования представленной модели. Оценка АКФ для климатического ряда (рис.11) и ежегодных рядов показала, что случайная составляющая аппроксимируется экспонентой. Верификация модели показала, что ошибка не превышает 10%.

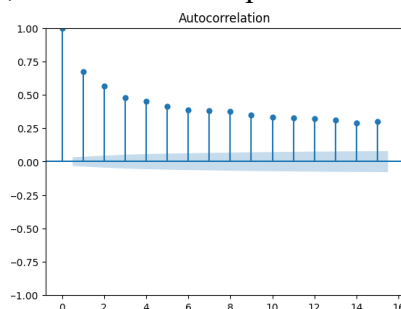


Рисунок 11 – Автокорреляционная функция для климатических значений эвапотранспирации за период 2013–2022 гг.

Опыт применения представленной модели продемонстрировал, что она дает возможность отражать и прогнозировать главные гидрометеорологические условия, в частности показатель суммарной потери влаги из почвы и листьев на территориях агропромышленного комплекса. В результате моделирования данных климатических параметров формируется представление об уровне влагообеспеченности почвы, что позволит правильно принять решение ЛПП. Характер динамических процессов, полученный с помощью модели, может быть использован для дальнейшего развития территорий агропромышленного комплекса и оперативного гидрометеорологического обеспечения.

Методика оценки вероятности наступления опасного явления в геоинформационных системах включает следующие расчетные этапы (рис.12):

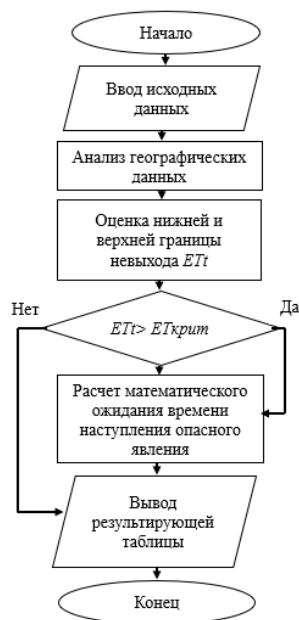


Рисунок 12 – Методика оценки вероятности наступления опасного явления в геоинформационных системах на примере территорий агропромышленного комплекса

Далее рассмотрим каждый этап методики оценки риска:

1. Ввод геоданных, полученных с помощью геомоделирования;

Ввод исходных данных реализуется пользователем путем загрузки файла данных выбранных характеристик суммарной потери влаги из почвы и листьев на требуемый момент времени. Файлы формируются в результате геомоделирования, описанного ранее.

Пользователь задает глубину прогноза оценки риска и предельно допустимые значения характеристик суммарной потери влаги из почвы и листьев.

2. Анализ геоданных (включает расчет первичных статистик $ET(t)$, эмпирической функции распределения, соответствие нормальному закону распределения, оценку трендовой компоненты, проверку ряда на стационарность и эргодичность).

3. Оценка верхней и нижней границы вероятности превышения параметром заданного уровня

4. Вычисление математического ожидания времени наступления и продолжительности превышения параметра заданного уровня.

5. Вывод полученных результатов в табличном виде с указанием верхней и нижней границы вероятности не выхода случайного процесса за заданные пределы, время наступления и окончания опасного явления и его продолжительности. Для исследуемого климатического ряда таблица имеет следующий вид, представленный на рисунке 13, с пояснительной запиской.

время	нижняя граница	верхняя граница	математическое ожидание
0	1.0177860837015145	1.3179497827157227	1.1678679332086186
1	2.173321889905815	2.4734855889200236	2.3234037394129192
2			
3			
4			
..			
3640			
3641			
3642			
3643			
3644			

Засуха, наступит 20/07/2023, продолжительность 5 суток

Рисунок 13 – Пояснительная записка по результатам расчетов для климатических значений за период 2013–2022 гг.

В качестве апробации гидрометеорологической модели и методики разработана программа для мобильных устройств на операционной системе Android в среде разработки Android studio на языке программирования Kotlin на примере территории Ростовской области, которая включает следующие аграрные районы: Азовский, Дубовский, Зерноградский.

Научная новизна модели заключается в том, что разработана модель прогнозирования суммарной потери влаги из листьев и почвы на территориях агропромышленного комплекса, посредством использования уравнения Пенмана-Монтейна, на основании гидрометеорологических данных и системы сбора геоданных, с целью расчета пространственно-временной изменчивости характеристик динамического объекта ГИС. Впервые применена модель и методика оценки вероятности наступления опасного явления на основании математического ожидания времени наступления опасного явления и его продолжительности при известных значениях параметра на начальный момент времени на основе геоданных гидрометеорологического моделирования.

В **третьей главе** разработаны практические рекомендации по использованию представленных моделей и методики в геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС на территориях агропромышленного комплекса.

Правильное и эффективное решение задач управления невозможно без соответствующего информационного обеспечения управленческой деятельности, которое осуществляется на основе специализированной системы мониторинга текущей ситуации. Главной особенностью современных систем контроля является их связь с геоинформационными системами в качестве пространственной информационной платформы, которая обеспечивает осуществление пространственно-временной интеграции данных.

На рисунке 14 представлена реализованная база данных геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами агропромышленного комплекса.

Современные геоинформационные системы применяют совершенно новый подход к исследованию различных проблем и разрешению сложных задач, базирующийся на учёте пространственных свойств систем. Перспективы геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами должны обеспечивать возможность прогнозирования изменений в явлениях и событиях окружающего мира с определением и выделением ключевых пространственных факторов и причин, определять их возможные последствия, а также составлять планы деятельности различных территориально распределенных заинтересованных объектов, предоставляя им помощь в принятии важных решений.

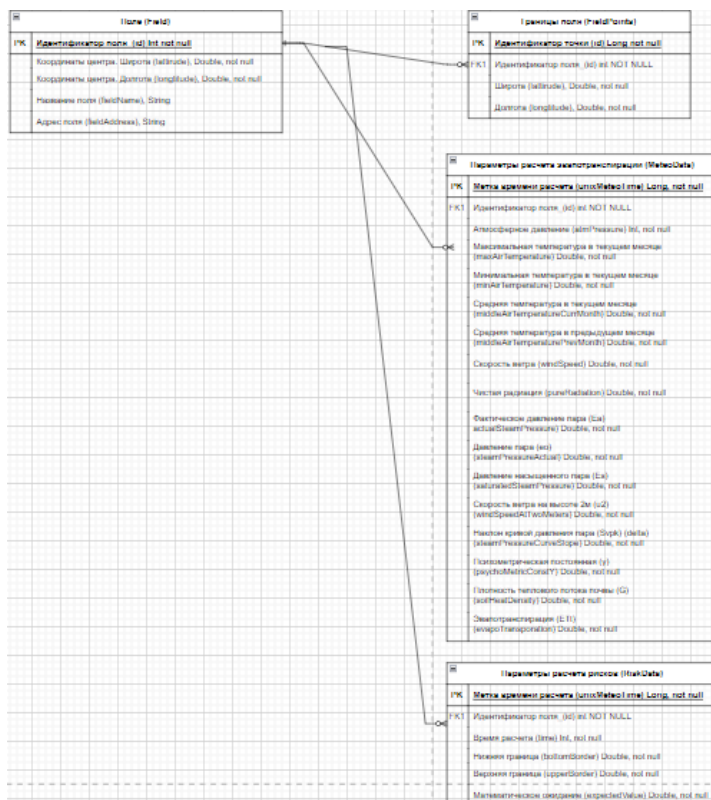


Рисунок 14 – База данных геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами агропромышленного комплекса

Геоинформационная система поддержки принятия решения для управления динамическими объектами совместно с системой мониторинга используется для решения следующих задач: сбор и обработка сведений о внешней и внутренней среде, формирование пространственной модели управляемого объекта и наглядное её отображение, оценка динамики развития процессов, прогнозирование и оценка рисков изменения ситуации, разработка вариантов управляющих решений, организация контроля за выполнением решений.

Геопространственная информация о состоянии климатических параметров объектов агропромышленного комплекса может храниться в разных информационных системах, на разных носителях, а также преобразовываться в разные форматы. Вся информация, которая формируется в процессе эксплуатации, создает своеобразное информационное пространство геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами. Уникальность представления геопространственных данных требует применения и обработки координатной информации, опираясь на привязку к атрибутивным данным.

Геоинформационные системы, используемые в последнее десятилетие, являются абсолютно новым видом интегрированных информационных систем, которые работают с геопространственной координатно-привязанной информацией, вследствие чего имеют характерную специфику по формированию и обработке геоданных, при этом содержат методы обработки данных предыдущих автоматизированных информационных систем.

Функции геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления динамическими объектами ориентированы на планирование развитием объекта в пространственном аспекте, что позволяет им корректно управлять, определять цели, а также действия для достижения этих целей. Планирование стоит рассматривать как процесс принятия решений о достижимых состояниях динамических объектах, путях

и способах достижения рациональных состояний и основных критериях оценки результатов деятельности.

Типовая структура геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления объектами включает следующие составляющие, которые представлены на рисунке 15:

- БД (с системой управления - СУБД);
- БЗ (с системой управления - СУБЗ);
- систему управления геоинформационной системой поддержки принятия решений с выходом на соответствующую пользовательскую панель, согласованную с предпочтениями пользователя;
- систему мониторинга за динамическими объектами.

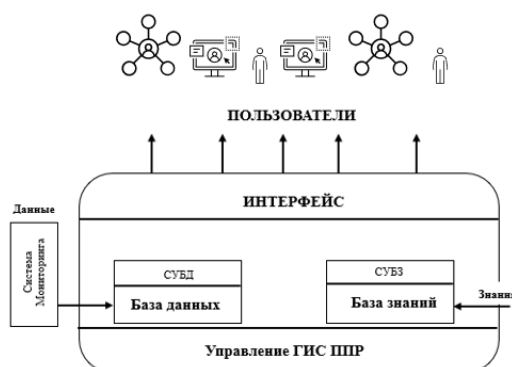


Рисунок 15 – Типовая структура ГИС ППР для управления динамическими объектами

В ходе обработки и анализа информации формируется система рекомендаций, направленная на повышение результативности управления, улучшение организационной структуры и экономической деятельности, повышение качества основных и вспомогательных процессов. В геоинформационной системе поддержки принятия решений создается картина актуальной обстановки, анализируется и оценивается текущее состояние, определяется управляющее воздействие, отбираются варианты решений, способствующие корректной работе информационной системы и выполнению поставленных задач, а также реализуется мониторинг и анализ результатов выполнения решений.

Для определения пространственного распределения параметров природно-технической среды принципиально использовать систему прогнозирования, которая поможет оценить ее будущее состояние. Расчет и прогнозирование осуществляются с использованием метеодинамического моделирования гидрометеорологических характеристик динамических объектов в соответствии с заданными гидрометеорологическими параметрами. Результаты, полученные посредством анализа параметров, собранных с датчиков на территории, могут использоваться для создания базы знаний.

Таким образом, разработанные практические рекомендации по применению объектно-ориентированной геоинформационной системы поддержки принятия решения позволяют лицам, принимающим решения, получить данные для безопасного управления динамическими объектами в аграрной отрасли.

В случае отсутствия регулярных гидрометеорологических данных или по иным причинам отсутствия исходных данных использование модели допустимо, однако

качество прогноза гидрометеорологических параметров может снизиться. При оперативном применении (разработке краткосрочных прогнозов) итоги прогнозирования отвечают требованиям к гидрометеорологическим прогнозам и являются успешными до тех пор, пока различие между прогнозируемыми и фактическими данными не превысит 30%.

Методика определения вероятности наступления опасного явления на основе созданной инновационной математической модели при известных начальных геопространственных данных, включенная в систему управления ГИС с возможностью доступа к соответствующему пользовательскому интерфейсу, будет полезна ЛПР при принятии решений по управлению. Для оценки рисков пользователь проводит вероятностное моделирование превышения параметров суммарной потери влаги из почвы и листьев указанных критических значений.

Методика анализа геоданных при оценке рисков с учетом влияния опасного явления на территории агропромышленного комплекса представлена на рисунке 16.

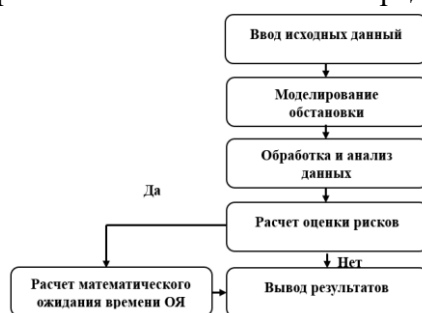


Рисунок 16 – Методика обработки геоданных

Итоговый прогноз оценки риска включает:

- автоматически сформированный текстовый документ с информацией о результатах возникновения опасного явления (вероятность и время превышения критических параметров, сведения о прогнозируемом параметре суммарной потери влаги из почвы и листьев, температуре воздуха, скорости ветра и так далее);

- карту территории агропромышленного комплекса с демонстрацией степени риска с использованием цветовой шкалы уровня риска. Риск определяется на основании руководящих документов для изучаемого региона, руководств по гидрометеорологическому снабжению продовольственных территорий агропромышленного комплекса и директив Росгидромета.

Апробация была проведена на основе полученных и обработанных гидрометеорологических данных для территорий агропромышленного комплекса Ростовской области (Азовский, Дубовской и Зерноградский районы). Были проанализированы гидрометеорологические параметры внешней среды за каждый день с января 2013 года по декабрь 2022 года включительно с промежутком 3 часа. За данный промежуток времени были выполнены расчеты значения суммарной потери влаги из почвы и листьев. Для оценки вероятности наступления опасного явления были установлены предельные значения гидрометеорологических параметров (рис.17).

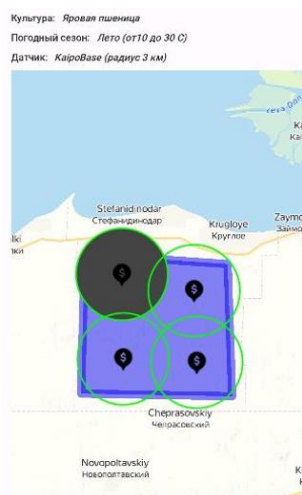


Рисунок 17 – Прогноз вероятности возникновения опасного явления на территориях агропромышленного комплекса Ростовской области

Научная новизна состоит в разработке практических рекомендаций по применению предложенных новых моделей и методики в геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода к проектированию ГИС.

Заключение.

Для решения актуальной научной задачи по разработке моделей и методики проектирования и обработки данных геоинформационных систем поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на примере агропромышленного сектора были созданы новые, научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие первостепенное значение для развития страны. Эти разработки включают в себя:

1. Требования к геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС, реализующей отображение динамических объектов, содержащих пространственные и пространственно-временные данные, которые отличаются тем, что впервые используют динамический объект в ГИС, что позволяет решить проблему обеспечения геоданными на больших территориях агропромышленного комплекса и сформировать требования к проектированию геоинформационных систем поддержки принятия решений для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования и обработки данных ГИС в аграрном секторе, а также требования к моделям и методике.

Были определены условия, влияющие на развитие агропромышленного сектора на территории Российской Федерации. Определено направление развития в сторону цифровизации и внедрения информационных технологий, что подчёркивает необходимость внедрения геоинформационных технологий в аграрном секторе, включая территории малого масштаба. Метод моделирования обусловлен отсутствием систематических замеров гидрометеорологических данных на обширных территориях аграрного сектора, а также малым количеством гидрометеорологических станций. В результате анализа гидрометеорологических показателей были выявлены параметры, которые в наибольшей степени влияют на возможность возникновения рисков засухи и переувлажнения почвы на территории агропромышленного сектора и потенциальные риски для развития динамических объектов.

2. Модель прогнозирования суммарной потери влаги из почвы и листьев на территориях агропромышленного комплекса, которая *отличается* тем, что в ней впервые представлена модель эвапотранспирации на основе уравнения Пенмана-Монтейта, что *позволит* обеспечить точность краткосрочных гидрометеорологических прогнозов до 95%. Эта модель была апробирована на реальных динамических объектах (территориях агропромышленного сектора) Ростовской области (Азовском, Дубовском и Зерноградском районах), где раньше подобные исследования по моделированию прогнозирования суммарной потери влаги из почвы и листьев не проводились. Полученные данные были верифицированы с помощью натуральных наблюдений. Оценка показала, что модель соответствует данным натуральных наблюдений, и ошибка не выходит за пределы 5%. Результаты моделирования представлены в виде пространственно-временного изменения параметров гидрометеорологических данных (среднесуточная температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность, прямая радиация на культуру, плотность теплового потока от почвы, давление насыщенных паров, фактическое давление паров, дефицит давления насыщенных паров, наклон кривой давления паров, психометрическая константа). Был проведён анализ погодных условий и выявлены особенности пространственной и временной изменчивости гидрометеорологических параметров на протяжении исследуемого периода на рассматриваемых территориях агропромышленного сектора.

3. Модель и методика оценки вероятности наступления опасного явления, которая *отличается* тем, что базируется на геоданных с применением параметрической вероятностной модели. Эта модель впервые была применена для определения времени ожидания возникновения опасного события при известных исходных геоданных, что *позволяет* увеличить точность оценки риска воздействия погодных условий на объекты агропромышленного сектора до 90%.

Проводится анализ данных с помощью расчета описательной статистики, проверки стационарности и соответствия нормальному распределению. Также выполняется оценка и сглаживание тренда, а также вычисление автокорреляции и взаимной корреляции. Апробация показала, что оценка верхнего и нижнего пределов вероятности возникновения риска при известных исходных условиях дает ошибку в пределах 10% в исследуемом временном интервале при заданном уровне прогнозирования.

4. Практические рекомендации по применению полученных моделей и методики проектирования и обработки данных в геоинформационной системе поддержки принятия решения для управления динамическими объектами на основе объектно-ориентированного подхода проектирования геоинформационных систем на территориях агропромышленного комплекса, которые *отличаются* тем, что основываются на разработанных нами моделях и методике проектирования и обработки данных для динамических объектов в объектно-ориентированных ГИС. Это *позволит* обеспечить геопространственное моделирование данных для поддержки процесса принятия решений посредством визуализации.

Их правильное объединение требует дальнейшего тщательного изучения и более масштабного тестирования и развития обеих моделей с учетом неучтенных обстоятельств.

Несмотря на ряд ограничений, эксперименты показали довольно хорошие результаты для оперативной обработки и имеют потенциал для дальнейшего совершенствования.

Основные направления будущих исследований включают увеличение числа гидрометеорологических параметров модели, адаптацию моделей и методов на других территориях агропромышленного сектора, а также разработку практических рекомендаций по использованию полученных результатов специалистами в области гидрометеорологического обеспечения динамических объектов агропромышленного сектора с использованием геоинформационных систем управления.

Список публикаций по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Сафонова Т.В. Применение математической модели потери влаги культурой и почвой в цифровых двойниках (ЦД) агропромышленных объектов. Международный научно-исследовательский журнал / Истомин Е.П., Яготинцева Н.В., Колбина О.Н., Мокряк А.В. 2023. №11 (137)

2. Сафонова Т.В. Взаимодействие глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы связи с объектами IoT в сельскохозяйственном производстве. Международный научно-исследовательский журнал/ Истомин Е.П., Яготинцева Н.В., Колбина О.Н., Мокряк А.В. 2023. №11 (137)

3. Сафонова Т. В., Колбина О.Н., Яготинцева Н.В. Мокряк А.В. The use of multi-agent systems in forestry IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol 806. 2021

4. Сафонова Т.В., Яготинцева Н.В., Истомин Е.П., Колбина О.Н., Кочнев А. Application of GIS forecasting in forestry based on a neural network IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021

5. Сафонова Т.В., Колбина О.Н., Истомин Е.П., Каламбет М.В., Яготинцева Н.В., Peculiarities of creating a database for the IoT system of urban forest management in the city of St. Peterburg IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021

6. Сафонова Т.В., Мокряк А.Ю., Мокряк А.В., Скюдтаев С. В., Determination of Causes of Copper Wires Beads after in Vehicles Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. 2021
В изданиях, индексируемых в международных базах данных:

7. Сафонова Т.В., Колбина О.Н., Яготинцева Н.В., Мокряк А.В. Определение состояния лесного массива в ГИС с использованием мультиагентного подхода Международный научно-исследовательский журнал №4-1 (106). 2021

8. Сафонова Т.В., Колбина О.Н., Яготинцева Н.В., Мокряк А.В. Контроль и мониторинг экологической безопасности окружающей среды Международный научно-исследовательский журнал 54-1 (119). 2022. С. 115-119.

9. Сафонова Т.В., Яготинцева Н.В., Колбина О.Н., Мокряк А.В. Выбор методики прогнозирования рисков возникновения лесных пожаров Безопасность труда в промышленности. 2022. №4. С.69-74.

10. Сафонова Т.В., Яготинцева Н.В., Колбина О.Н., Мокряк А.В. Концепция развития интернета вещей информационные технологии: управление, экономика Транспортное право. 2022. №2(42). С.4