

На правах рукописи

Ермолаева Ольга Сергеевна

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ И ЗОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА
АКТУАЛЬНОГО СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ ОРОШАЕМЫХ И
НЕОРОШАЕМЫХ АГРОЦЕНОЗОВ МАРКОВСКОГО РАЙОНА
САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 2003–2017 ГГ.**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель

Зейлигер Анатолий Михайлович,
доктор биологических наук, кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории гидроинформатики ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), главный научный сотрудник Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН)

Официальные оппоненты:

Исаева София Давидовна,
доктор технических наук, профессор, заведующая отделом экосистемного водопользования и предотвращения опустынивания земель ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова»

Брыль Сергей Валерьевич,
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела геоинформационных технологий и мониторинга мелиоративных систем ФГБНУ «ВНИИ Радуга»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации» (ФГБНУ «Волж-НИИГиМ»)

Защита состоится «9» декабря в 10.00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, аудитория 201, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2025г.

Ученый секретарь

диссертационного совета _____ Мартынова Н.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время, характеризующееся увеличением народонаселения Земли, а также нарастающими климатическими флуктуациями, обеспечение потребностей в сельскохозяйственной продукции становится одним из ключевых вопросов международной повестки, что подтверждается документами генеральной ассамблеи ООН по вопросам устойчивого развития, Всемирного экономического форума по оценке глобальных рисков, а также Римской декларации по всемирной продовольственной безопасности».

В Российской Федерации продовольственная безопасность является одним из основных приоритетов экономической и аграрной политики государства, отраженным Указом Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 “Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации”.

Российская Федерация располагает достаточной ресурсной базой для устойчивого роста аграрного производства, способного удовлетворить национальные интересы в сфере продовольственной безопасности на долгосрочную перспективу. Одно из направлений такого роста связано с повышением плодородия сельскохозяйственных земель, расположенных на территориях с высоким биоклиматическим потенциалом и недостатком доступных для сельскохозяйственных посевов запасов почвенной влаги, которые характерны для зон с аридным климатом и дефицитом водных ресурсов, а также зон с периодическими метеорологическими и сельскохозяйственными засухами. Для преодоления ограничения плодородия агроценозов по доступным запасам почвенной влаги используется их орошение, для совершенствования которого в разрезе рационального использования водных и земельных ресурсов развиваются новые подходы и методы мониторинга и управления, основанные на объективных данных состояния и потребностей сельскохозяйственных растений в воде, получаемых с использованием современных технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также результатов агрогидрологического моделирования процессов энерго- и массопереноса в подстилающем слое атмосферы.

Одной из базовых характеристик агрогидрологических моделей является актуальный (фактический) поток суммарного испарения (эвапотранспирации) (E_{Ta}), который формируется при переходе почвенной влаги из жидкой фазы в газообразную в результате испарения с поверхности почвенного покрова E_v , а также в результате транспирации с поверхности вегетирующего растительного покрова Tr , суммарный объем которых в годовом исчислении достигает порядка 60% от суммарного объема осадков, выпадающих на поверхность суши. Формирование потоков E_{Ta} на сельскохозяйственных землях представляет собой сложный для описания процесс, пространственно-временные характеристики которого связаны, как с погодными условиями, так и с антропогенным воздействием. В этой связи стремительное развитие цифровых технологий мониторинга Земли из космоса, идущее с начала XXI века, дало толчок разработке и непрерывному совершенствованию методов получения объективных данных по оценке потока E_{Ta} . Одними из объектов приложения этих методов являются орошаемые и неорошаемые агроценозы, которые наряду

с интродукцией высокоурожайных сортов сельскохозяйственных культур, защитой сельскохозяйственных растений, рекультивацией, мелиорацией сельскохозяйственных земель и др., являются приоритетными направлениями исследований на пути перехода к цифровым технологиям точного орошаемого земледелия. В этой связи выбор темы настоящего диссертационного исследования вызван актуальностью, а также востребованностью результатов пространственно-временного анализа потока ETa для целей агрогидрологического мониторинга использования запасов почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвенного покрова (КС-ПП) орошаемых и неорошаемых пахотных земель.

Степень разработанности темы. Исследования, посвященные оценке локальных характеристик потока ETa , в частности агроценозов, по данным измерений на так называемом точечном уровне, представлены в многочисленных публикациях отечественных и зарубежных исследователей, таких как А. М. Алпатьев, С. М. Алпатьев, Х. Ф. Блейни, А. И. Будаговский, М. И. Будыко, А. И. Голованов, Е. М. Гусев, Н. Н. Дубенок, Н. Н. Иванов, А. Р. Константинов, У. Д. Кридл, Г. К. Льгов, В. С. Мезенцев, А. А. Молчанов, Х. Л. Пенман, К. Пристли, В. В. Пчелкин, Г. Т. Селянинов, Р. Тейлор, Ц. У. Торнтвайт, Л. Тюрк, Ж. Харгривс, А. Ю. Черемисинов, Д. Б. Циприс, И. А. Шаров и многих других.

При решении практических задач экстраполяция результатов точечных оценок потока ETa на площадной уровень приводит к значительным неопределенностям. В связи с этим в агрогидрологическом мониторинге применяются подходы и методы, основанные на данных ДЗЗ. Оценке характеристик потока ETa на площадном уровне посвящены работы Р. Аллена, В. Бастиансена, Дж. Мецикальски, Е. Л. Музылева, Й. Нормана, З. Су, М. Тасуми, Г. Топпа, Р. Феддеса, Я. Янга и многих других. Результаты применения данных ДЗЗ для оценки региональных и зональных характеристик потока ETa орошаемых и неорошаемых агроценозов приведены в настоящей диссертационной работе на примере территории Марковского района Саратовской области.

Объект исследования: пространственно-временные характеристики потока актуального суммарного испарения ETa на территориях, занятых орошаемыми и неорошаемыми агроценозами.

Предмет исследования: методы, модели, способы и алгоритмы пространственно-временного анализа характеристик потока актуального суммарного испарения на территориях, занятых орошаемыми и неорошаемыми агроценозами.

Цель и задачи исследований. Целью исследований является повышение эффективности агрогидрологического мониторинга потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

1. Провести библиографический анализ научно-методических публикаций по оценке потока актуального суммарного испарения с поверхности суши и оценить их применимость для достижения цели настоящего диссертационного исследования.

2. Разработать модель и сформировать слои базы геоданных для оценки региональных и зональных характеристик потоков актуального суммарного испарения на территории Марковского района Саратовской области за 2003–2017 гг. с использованием данных дистанционного зондирования Земли, а также провести верификацию продукта MOD16ET по данным полевых экспериментов.

3. Провести совершенствование методики разведочного анализа данных и на ее основе оценить региональные характеристики пространственно-временного куба потока суммарного испарения за оросительный период, сформированного по результатам дистанционного зондирования Земли для территории Марковского района Саратовской области в 2003–2017 гг.

4. Разработать методику оценки региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения за оросительный период (ET_{av}) орошаемых и неорошаемых агроценозов, полученных по результатам дистанционного зондирования Земли для территории Марковского района Саратовской области в 2003–2017 гг., а также оценить влияние внешних драйверов на полученные результаты.

Научная новизна. Научная новизна исследований региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов Марковского района Саратовской области за 2003–2017 гг. заключается в:

- разработке нового подхода к оценке потока актуального суммарного испарения за оросительный период ET_{av} с использованием данных дистанционного зондирования Земли и верификации использованных наборов геоданных продукта MOD16ET по данным полевых экспериментов на неотрывных почвенных монолитах;

- разработке модели базы геоданных для оценки региональных и зональных характеристик потока ET_{av} и ее реализации для указанной территории;

- совершенствовании методики разведочного анализа данных для оценки пространственно-временных характеристик потока ET_{av} орошаемых и неорошаемых агроценозов, полученных по результатам дистанционного зондирования Земли;

- разработке методики оценки региональных и зональных характеристик потока ET_{av} орошаемых и неорошаемых агроценозов, полученных по результатам дистанционного зондирования Земли, характеризующих их пространственно-временную динамику.

Методология и методы исследования. Методология диссертационного исследования представляет собой эмпирическую оценку наличия пространственно-временной вариации потока актуального суммарного испарения с территорий, занятых орошаемыми и неорошаемыми агроценозами, и включает в себя теоретические (абстрагирование, анализ и синтез, индукцию и дедукцию) и эмпирические (наблюдение, эксперимент, сравнение и измерение) научные подходы, методы и алгоритмы, позволившие получить искомые результаты по данным дистанционного зондирования Земли для территории Марковского района Саратовской области за 2003–2017 гг.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты верификации применимости наборов данных продукта MOD16ET для оценки потока актуального суммарного испарения с использованием наборов данных полевых экспериментов на неотрывных почвенных монолитах, оборудованных на территории Марковского района Саратовской области.

2. Модель базы геоданных и методы наполнения ее слоев наборами геоданных Марковского района Саратовской области, разметки и пространственно-временного анализа для оценки региональных и зональных потоков актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов.

3. Методика разведочного анализа слоев геоданных потока актуального суммарного испарения с поверхности суши, полученных по данным дистанционного зондирования Земли, а также результаты ее применения для оценки региональных и зональных характеристик этого потока с территорий Марковского района Саратовской области, занятых орошаемыми и неорошаемыми агроценозами.

4. Методика оценки региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли, а также результаты ее применения для территории Марковского района Саратовской области.

Личный вклад соискателя. Представленные в диссертационной работе результаты полевых экспериментов и их обработки, а также сбора и анализа наборов данных дистанционного зондирования Земли были получены лично соискателем в ходе выполнения инициативных проектов, а также грантов, реализованных научными коллективами, членом которых он являлся.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследований заключается в развитии научно-методических основ мониторинга потока актуального суммарного испарения с поверхности суши с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Практическая значимость исследований заключается в разработке методики использования данных дистанционного зондирования Земли для оценки региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов за оросительный период.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика:

16. Разработка и изучение методов мониторинга компонентов агроэкосистем (почв, агроценозов, приземного слоя атмосферы). Создание и исследование способов, приемов, технических систем и средств контроля, диагностики и управления состоянием сельскохозяйственных земель;

20. Разработка информационных методов, технологий, баз данных и гидродинамических моделей по поддержке принятия решений управления водными ресурсами в мелиоративно-водохозяйственном комплексе;

23. Разработка новых методов исследований, приборов и оборудования для локального определения физических, химических и биологических показателей системы «почва – растение – приземный слой атмосферы», разработка

инструментария для прецизионного возделывания сельскохозяйственных культур;

26. Разработка методов, алгоритмов, инструментальных средств и систем получения, обработки и комплексного использования наземной информации и данных дистанционного зондирования Земли.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность основных положений и выводов работы основана на всестороннем анализе исследуемой предметной области, объективности данных дистанционного зондирования Земли, корректности использованного математического аппарата и вводимых допущений, адекватности применяемых методов анализа данных, а также на отсутствии противоречий с известными положениями теории и практики математического описания водного баланса почвенного покрова суши, а также результатами статистического и геостатистического анализов.

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и зарубежных конференциях (устные и стендовые доклады): 1) 14-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 14–29 ноября 2016 г. (Тема доклада: Компьютерный код оценки эвапотранспирации агроценозов по данным ДЗЗ). 2) 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1). Hammamet, Tunisia, 12–15 ноября 2018 года. (Тема доклада: Warm Season Trends of ETa: A Case Study of Near-North Caspian Low Lands); 3) 17-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2019 г. (Тема доклада: Пространственно-временные тренды суммарного испарения с подстилающего слоя по данным MODIS за период 2002-2019г. на территории Марковского района Саратовской области); 4) 2nd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-2). – 2nd Edition. Springer, Cham, 2021. (Тема доклада: Evaluating Satellite-Derived Evapotranspiration Trends: A Case Study of the Markovsky District of the Saratov Region (RF)); 5) III Всероссийская научная конференция с международным участием. Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2021 г. (Тема доклада: Методы, масштабы и данные дистанционного зондирования в моделях роста и развития агрофитоценозов); 6) III Международная научная конференция. Санкт-Петербург, 14–15 сентября 2021 г. (Тема доклада: Кейс пространственной корреляции между урожайностью биомассы посева орошаемой люцерны и влагозапасами почвенного покрова); 7) Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 155-летию РГАУ - МСХА имени К. А. Тимирязева «Доклады ТСХА». Москва, 02–04 декабря 2020 года. (Тема доклада: Интеллектуальный анализ актуальных потоков суммарного испарения с территории Марковского района Саратовской области); 8) 18-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16–20 ноября 2020 г. (Тема доклада: Пространственно-временная дифференциация потоков суммарного испарения вегетационного периода по типам землепользования на примере территории Марковского района Саратовской области); 9) 19-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 15–19 ноября 2021 г. (Тема доклада: Кластерный анализ картограмм трендов потоков суммарного испарения за 2003–2017 г. на территории

Марковского района Саратовской области); 10) 20-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 14–18 ноября 2022 г. (Тема доклада: Гибридный метод картографического моделирования потоков суммарного испарения орошаемых агрофитоценозов на основе сочетания данных оптической и тепловой съемки аппаратурой Landsat и MODIS, а также механистических моделей AquaCrop и METRIC); 11) 21-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 13–17 ноября 2023 г. (Тема доклада: Результаты анализа потоков суммарного испарения орошаемых и орошаемых агроценозов на территории Марковского района Саратовской области за оросительные периоды 2003–2017 г. с использованием продукта MOD16A2); 12) Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 100-летию образования ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова. Москва, 09–11 октября 2024 г. (Тема доклада: Водозэффективность орошения агроценозов: состояние, методы, перспективы); 13) 22-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11–15 ноября 2024 г. (Тема доклада: Идентификация орошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли с применением методов машинного обучения); 14) 22-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11–15 ноября 2024 г. (Тема доклада: Оценка пространственного варьирования урожайности орошаемых посевов сои (2023 г.) с использованием наборов геоданных пробных укосов и суммарного испарения по модели METRIC (Landsat 8–9)).

Диссертационные исследования выполнялись в рамках научно-исследовательских работ: 1) Грант РФФИ №23-27-00438 «Метод оценки эффективности использования продуктивных запасов почвенной влаги на примере орошаемых и неорошаемых посевов сои»; 2) Грант РФФИ №19-29-05261 «Картографическое моделирование влагозапасов почвенного покрова на основе комплексной геофизической влагометрии для целей цифрового орошаемого земледелия»; 3) Грант РФФИ №16-05-01097А «Водопотребление агроценозов на "точечном" и "площадном" уровнях исследований»; 4) Грант РФФИ №15-45-01060 р_юг_а «Использование сопряженных данных дистанционного зондирования Земли и наземных обследований для разработки метода контроля за размещением посевов сельскохозяйственных монокультур».

Результаты диссертационной работы внедрены:

1. При разработке метода оценки эффективности использования продуктивных запасов почвенной влаги, в рамках работ по проекту РФФИ 23-27-00438 Метод оценки эффективности использования продуктивных запасов почвенной влаги на примере орошаемых и неорошаемых посевов сои.

2. При разработке базы данных «Пространственные характеристики потоков суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агрофитоценозов с сельских территорий» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621331 Российская Федерация. № 2023621052: заявл. 21.04.2023 : опубл. 26.04.2023).

3. При разработке программы для ЭВМ «Программа для расчета растровых слоев влажности поверхностного слоя почвенного покрова» (Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682426 Российская Федерация., № 2023681458: заявл. 18.10.2023: опубл. 25.10.2023).

4. При разработке программы для ЭВМ «Программа автоматической идентификации орошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли с применением методов машинного обучения» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684252 Российская Федерация, № 2024683533: заявл. 09.10.2024: опубл. 16.10.2024).

5. В учебном процессе и научно-исследовательской работе студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратуры 09.04.03 «Прикладная информатика» в РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 24 научных работах, включая 4 статьи в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук»; 8 публикаций, индексируемых в базе Scopus и 2 публикации в базе Web of Science, из которых 1 статья относится к категории «материалы международных конференций». По теме исследований получено 3 свидетельства о государственной регистрации интеллектуальной собственности: 1 база данных и 2 программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 175 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 52 рисунка, 4 таблицы, заключения, списка литературы, включающего 252 наименования, в том числе 180 – на иностранном языке и 4 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, ее задачи и положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, дана краткая характеристика диссертационной работы. Приведены сведения о публикации, апробации и внедрении результатов работы.

В первой главе приведены результаты библиографического анализа (БА) развития методов оценки потока актуального (фактического) суммарного испарения (ET_a) в задачах мониторинга составляющих водного баланса и влагозапасов почвенного покрова (ПП). С этой целью приведено описание характерных особенностей современного этапа развития агрогидрологических исследований, рассмотрены подходы, методы и модели, применяемые для оценок локальных (точечных) и пространственных (площадных) характеристик потока ET_a . Во втором разделе представлены результаты БА точечных методов, основанных на предложенной классификации, включающей метеорологические, микрометеорологические, биофизические и эмпирические методы, а также метод инверсии водного баланса расчетного слоя ПП в виде:

$$ET_{a,i} = P_i + M_i + W_{i+1} - W_i + q_i \uparrow + q_i \downarrow, \quad (1)$$

где $ET_{a,i}$ – поток суммарного испарения; P_i – слой осадков; M_i – поливная норма; W_i и W_{i+1} – запас почвенной влаги в расчетном слое ПП, соответственно, в начале и конце i -го интервала измерений; $q_i \uparrow$ – поток подпитывания расчетного слоя ПП

со стороны грунтовых вод; $q_i \downarrow$ – отток почвенной влаги из расчетного слоя ПП через его нижнюю границу.

В третьем разделе приведены результаты БА методов площадных оценок потока ETa с использованием данных ДЗЗ, основанных на методе инверсии теплового баланса подстилающего слоя в виде:

$$ETa = \frac{(Rn - G - H)}{L}, \quad (2)$$

где Rn – радиационный баланс, представляющий собой разницу между приходящим и уходящим потоками (длинноволновым и коротковолновым) солнечной радиации; G – поток тепла, направленный в почвенный профиль; H – турбулентный поток тепла; L – скрытая теплота испарения.

В этой связи рассмотрены модели, используемые для оценки потоков ETa по данным ДЗЗ, а также существующие цифровые сервисы и продукты, предоставляющие доступ к такого рода данным и их дериватам. В четвертом разделе представлен набор кейсов использования пространственных оценок потока ETa для решения ряда задач в области агрогидрологических исследований, связанных с мониторингом и управлением орошаемыми агроценозами. В частности, приведены результаты сопоставления оценок потока ETa , полученных по ряду моделей, а также анализа их достоинств и недостатков. В выводах представлены аргументы о целесообразности применения пространственных оценок потока ETa , основанных на данных ДЗЗ, для решения поставленных задач, что обосновывает актуальность исследования.

Вторая глава посвящена описанию природно-климатических характеристик Марковского района, развитию аграрного сектора и орошаемого земледелия, а также модели базы геоданных (БГД), предназначенной для решения поставленных перед диссертационным исследованием задач. В главе представлены результаты полевой верификации оценки потока ETa по данным дистанционного зондирования Земли. С этой целью изложено краткое описание природных и антропогенных факторов, а также условий, влияющих на развитие аграрного сектора и оросительного комплекса. Отмечено, что благоприятные почвенно-климатические и гидрогеологические условия, а также доступность водных ресурсов р. Волги послужили основой для развития орошаемого земледелия. Начало этому процессу положило введение в эксплуатацию в 70-е годы Приволжской оросительной системы имени И. П. Кузнецова (ПОС) и Комсомольской оросительной системы (КОС).

Для оценки характеристик потока ETa в ПО ArcGIS Pro 2.8 в проекции UTM38N были созданы слои базовых (БГ) и основных (ОГ) геообъектов БГД. При этом:

а) для слоев административных границ территории (БГ.1), населенных пунктов (БГ.2) и водных объектов (БГ.3) были использованы геоданные, размещенные на ресурсе OpenStreetMap;

б) для слоя осевых линий магистральных каналов ПОС и КОС (БГ.4) и слоев ОГ.2, местоположений границ земельных участков, обслуживаемых дождевальными машинами (ДМ) кругового действия (КД), были использованы результаты дешифрирования результатов съемки с космических аппаратов (КА) Landsat 5, 7-8;

в) для слоя БГ.5 (местоположения границ контуров ДМ-КД по состоянию на 1976 г.) был использован картографический материал проектов строительства;

7) для слоя БГ.6 (основные виды землепользования (ЗП)) были использованы растровые данные с пространственным разрешением 150 м, созданные в международном институте прикладных системных исследований ПАСА (г. Вена, Австрия);

8) для слоя БГ.7 (границы семи разно удалённых от уреза левого берега р. Волги зон) были использованы данные береговой линии р. Волги, размещенные на ресурсе OpenStreetMap, от которой производилось зонирование;

9) для слоя БГ.8 (местоположения метеостанции г. Маркс и г. Ершов), к которому были привязаны таблицы метеоданных, полученные из облачной базы данных Росгидромета, были использованы соответствующие координаты объектов;

10) для слоя БГ.9 (местоположения объектов проведения полевого мониторинга влагозапасов КС-ПП (2006–2009 гг.), к которому были привязаны таблицы экспериментальных данных, были использованы соответствующие координаты объектов;

11) для слоя ОГ.1 (поток *ETa* за исследованный 15-летний период), необходимого для проведения пространственно-временного (ПВ) анализа, были использованы тайлы геоданных *ETa8* продукта MOD16A2, формируемые по результатам съемки с платформы MODIS посредством метода инверсии теплового баланса (2) с использованием модели SEBS.

С целью получения единообразных результатов ПВ анализа был выбран единый временной интервал с 145-го дня (25 мая) по 241-й день (2 сентября) календарного года, соответствовавший среднесезонным датам начала и окончания оросительного сезона на ПОС и КОС. Это позволило сформировать 13 слоев потока *ETa* для каждого из 15 лет, каждый из которых содержал 20 887 записей, из которых было удалено 1 050 записей, попадавших на территории, занятые поверхностными водными объектами и муниципальными поселениями. В результате был создан ПВ-куб с общим количеством записей 3 570 660 единиц.

Результаты ПВ анализа слоев ОГ.2 выявили динамику количества ДМ-КД и суммарной площади орошения за исследованный период 2003–2017 гг. В первые две трети этого периода происходил, в основном, вывод ДМ-КД из эксплуатации, а в последнюю — замена ДМ-КД предыдущих поколений на новые, а также установка ДМ-КД в местах, которые были ранее выведены из орошаемого клина из-за низкой эффективности. При этом было отмечено, что увеличение обоих показателей во многом было связано с реализацией ФЦП «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы».

Анализ временных рядов норм осадков вегетационных периодов (май–август) 2003–2017 гг. по метеостанции г. Ершов выявил: а) увеличение в мае со средней скоростью 0,16 мм/год; б) убывание в июне со средней скоростью 0,08 мм/год; в) убывание в июле со средней скоростью 0,79 мм/год; г) убывание в августе со средней скоростью 0,25 мм/год. Аналогичный анализ временных рядов сумм суточных температур воздуха этих же месяцев выявил увеличение этого параметра в каждый из них, при этом наибольшие значения приходятся на июль и август (0,73 и 0,80 град/год), а наименьшие — на май и июнь (0,38 и

0,03 град/год). Совместная оценка влияния изменения этих двух параметров на испарение с водной поверхности (испаряемость) за май-август 2003-2017 гг., проведенная по зависимости Иванова, показала ее увеличение с 520 мм до 600 мм. Другая оценка, выполненная с использованием гидротермического коэффициента Селянинова, выявила смещение гидротермических условий июля и августа из категории сухого земледелия ($0,5 < ГТК < 0,7$) в категорию ирригации ($ГТК < 0,5$), что совместно с результатами оценки увеличения испаряемости свидетельствовало об увеличении аридизации климата в исследуемый период.

Верификация результатов оценки потока ET_{a8} по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на территории Марковского района была проведена с использованием данных наземного полевого мониторинга влажности КС-ПП, полученных на экспериментальном участке (рисунок 1а) с многолетним посевом орошаемой люцерны в 2006–2009 годах. Этот участок, включавший 6 опытных площадок размером 6х2 м, был расположен на неорошаемой части посева люцерны вблизи контуров, орошаемых дождевальными машинами кругового действия (ДМ-КД) «Фрегат» агрофирмы «Михайловское».

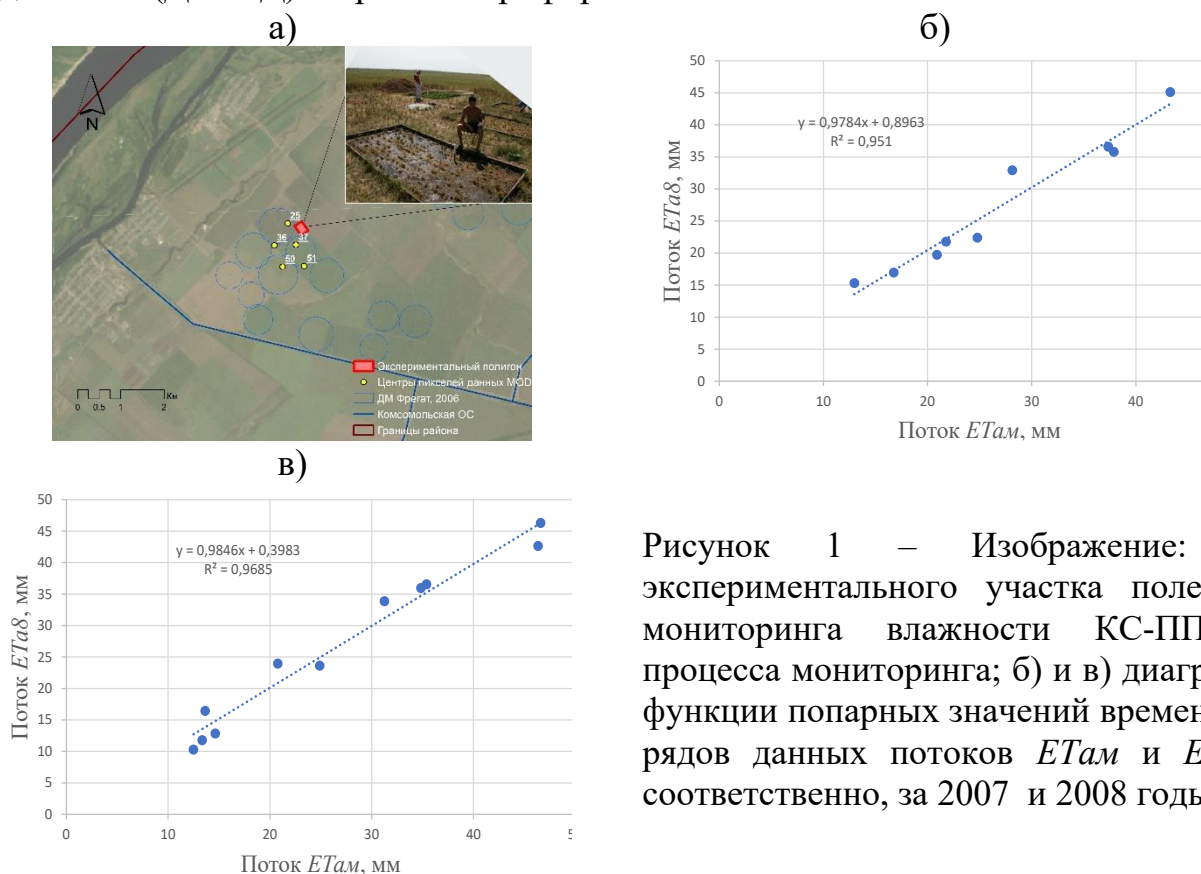


Рисунок 1 – Изображение: а) экспериментального участка полевого мониторинга влажности КС-ПП и процесса мониторинга; б) и в) диаграмм функции попарных значений временных рядов данных потоков ET_{am} и ET_{a8} , соответственно, за 2007 и 2008 годы

Мониторинг влагозапасов КС-ПП на опытных площадках был реализован влагомером TRIME-FM от компании «IMKO micromoduletechnik, GmbH», а метеорологические характеристики измерялись автоматической агрометеостанцией «ZENO – 3200», установленной на расстоянии порядка 1 км от экспериментального участка, вблизи насосной станции № 2 КОС. Расчет потока ET_a по данным наземного мониторинга в межполивные периоды для 2007–2008 годов был проведен методом инверсии водного баланса (1).

Рассчитанные по выражению (1) временные ряды потока $ET_{a,i}$ по шести экспериментальным площадкам, были просуммированы по восьмисуточным интервалам, соответствующим потокам ET_{a8} . С использованием этих сумм были

рассчитаны члены временного ряда средних экспериментальных значений $ET_{ам}$. Количественная оценка близости временных рядов потоков $ET_{ам}$ и $ET_{а8}$ была реализована с помощью корреляционного анализа в ПО MS Excel. На рисунках 16 и 17 представлены полученные диаграммы попарных значений потоков $ET_{ам}$ и $ET_{а8}$ двух наборов данных за 2007 и 2008 годы, а также рассчитанные характеристики функции линейной корреляции. Высокие значения коэффициентов парной корреляции этих двух наборов данных (соответственно, 0,951 и 0,969) свидетельствовали о значимой сопоставимости обоих потоков.

В третьей главе представлены результаты использования разработанной модели БГД Марковского района, а также методики усовершенствованного разведочного анализа геоданных (РАГеоД) для оценки региональных характеристик потока актуального суммарного испарения за оросительный период ($ET_{ав}$). С этой целью в первом разделе представлена методика формирования слоев геодатасета этого потока, заключающаяся в суммировании 13 значений потоков $ET_{а8}$ в интервале с 145-го по 241-й календарный день каждого из 15 исследованных лет. В результате было сформировано 15 слоев потока $ET_{ав}$ (рисунок 2), включающих 19 837 значений, соответствовавших так называемому фактическому водопотреблению.

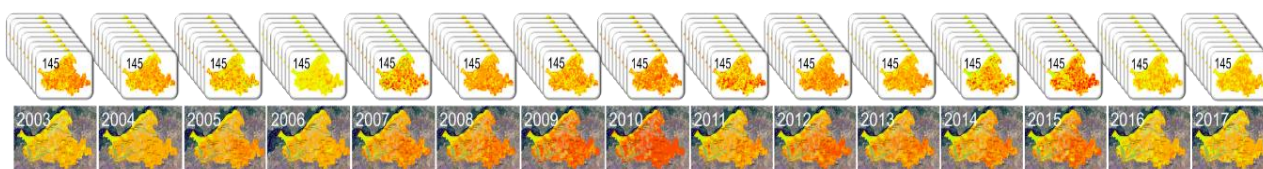


Рисунок 2 – Схема формирования 15 слоев $ET_{ав}$ за 2003–2017 гг.

Во втором разделе представлена методика РАГеоД (рисунок 3), которая включает в дополнение к методам статистического анализа геостатистические методы, сформированные в блоки анализа диаграмм рассеяния, статистического анализа мер центральной тенденции и рассеяния (ЦТиР), анализа трендов средних и медианных значений, кластерного геопространственного анализа, а также зонального анализа, которые были использованы, как для оценки характеристик региональных и зональных потока $ET_{ав}$ применительно к основным видам ЗП, так и для двух подвидов пахотных земель – орошаемых и неорошаемых.

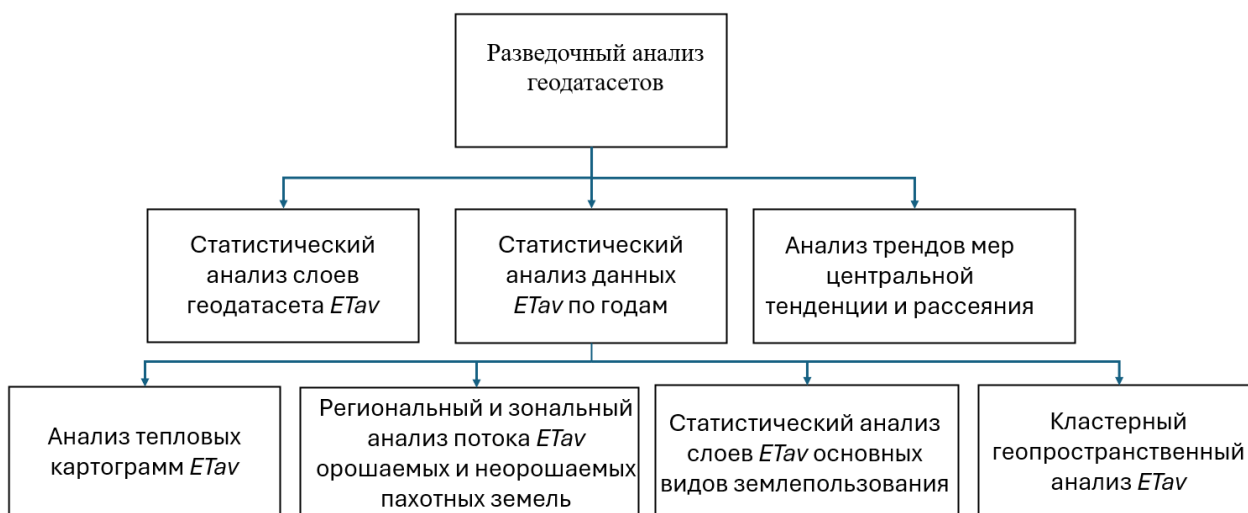


Рисунок 3 – Схема усовершенствованной методики РАГеоД геодатасета $ET_{ав}$

В третьем разделе, на основании анализа диаграмм рассеяния слоев потока *ETav*, была высказана гипотеза 1 о неоднозначном влиянии факторов и условий внешней среды на региональные характеристики потока *ETav*. Для ее проверки с использованием макроса, составленного в среде VBA, были рассчитаны значения мер ЦТиР пятнадцати слоев геодатасета *ETav*, а также скорости линейных трендов 4 основных видов ЗП по методике непараметрического статистического теста Манн-Кендалла. Полученные результаты выявили синхронно-устойчивую динамику региональных оценок средних и медианных значений потока *ETav*, а также их устойчивое ранжирование на протяжении всего исследуемого периода. В целом это позволило подтвердить правомочность гипотезы 1. В то же самое время для объяснения характерных особенностей потока *ETav*, присущих пахотным землям, была высказана гипотеза 2 о влиянии изменений в технологиях земледелия и растениеводства, а также динамики развития орошения.

В четвертом разделе представлена методика геостатистического анализа слоев геодатасета *ETav* с использованием геокластерного анализа, а также анализа трендов двух полупериодов: 2003–2010 гг. и 2010–2017 гг. Для этого был использован инструмент Optimized Hot Spot Analysis в программном обеспечении ArcGIS Pro 2.8, основанный на метриках локального индекса Морана. Идентифицированные при этом геокластеры «High-High», когда инциденты с высокими значениями скоростей трендов окружены инцидентами с аналогичными высокими значениями, нашли свое объяснение в близком расположении таковых к р. Волге, а также к магистральным каналами КОС и ПОС (рисунок 4). Этот признак, указывающий на наличие пространственно-временных связей между слоями ДМ-КД (ОГ.2) и слоями геодатасета *ETav* с присущей им внутренней структурой, позволил подтвердить правомочность гипотезы 2.

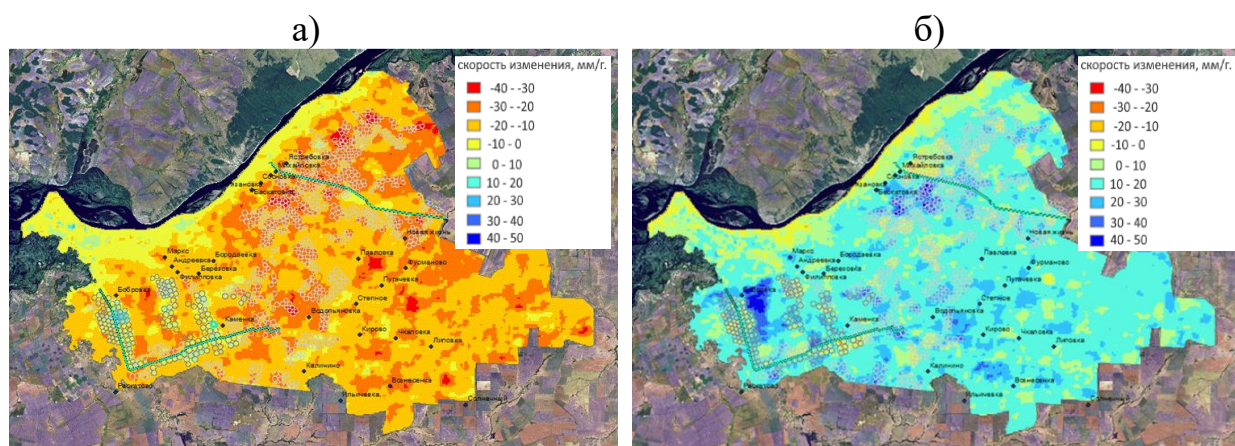


Рисунок 4 – Визуализация картограмм медианных значений скоростей линейных трендов двух полупериодов геодатасета *ETav*:

а) 2003–2010 гг.; б) 2010–2017 гг.

Для идентификации зонального характера части геодатасета *ETav*, «пахотные земли», были рассчитаны зональные характеристики ЦТиР зон разной удаленности от уреза левого берега р. Волги (рисунок 5).

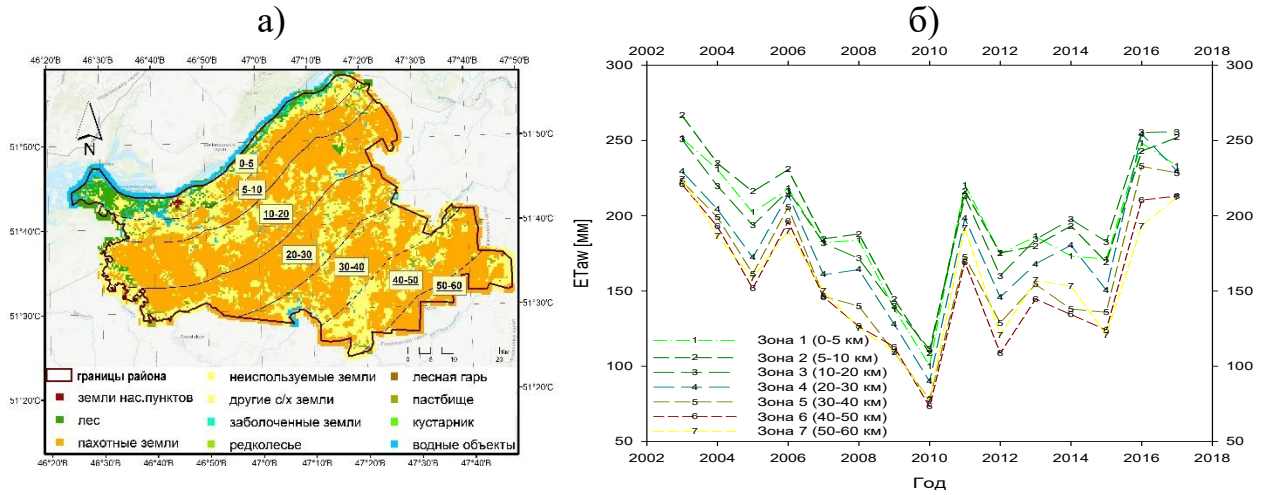


Рисунок 5 – Отображение: а) картограмма слоя БГ.7, границ зон разной удаленности от уреза левого берега р. Волги, на подложке раstra десяти видов ЗП; б) временных рядов медианных значений потока $ETav$ «пахотных земель» семи зон разной удаленности от уреза левого берега р. Волги (2003–2017 гг.)

Анализ временных рядов медианных значений зональных поднаборов геодатасета $ETav$ «пахотных земель» за 2003–2017 гг., позволил выявить наличие достаточно устойчивой синхронной динамики уменьшения соответствующих значений в юго-восточном направлении по мере удаления от уреза левого берега р. Волги (рисунок 5б).

В четвертой главе представлено описание этапов и процедур решения четвертой задачи диссертационного исследования, направленной на оценку региональных и зональных характеристик потока $ETav$ орошаемых и неорошаемых агроценозов на территории Марковского района Саратовской области исследованного периода 2003–2017 гг., а также содержит качественную оценку влияния внешних драйверов на полученные результаты.

В первом разделе представлена разработанная методика разметки слоев ЗП «пахотные земли» геодатасета $ETav$ на два подвида: 1) «орошаемые пахотные земли» (ОПЗ); 2) «неорошаемые пахотные земли» (НПЗ). Соответствующий код, основанный на двух допущениях, был реализован в ПО ArcGIS Pro 2.8. Первое из этих допущений заключалось в возможности полного или частичного попадания i -го пикселя j -го года $ETav_{j,i}$ внутрь k -го контура ДМ-КД того же j -го года. Второе допущение допускало полное или частичное попадание девяти примыкающих друг к другу пикселей геодатасета $ETav$ внутрь k -го контура ДМ-КД. Это позволило гарантированно покрывать такими пикселями внутреннее пространство контура ДМ-КД с максимальным идентифицированным диаметром, составившим 1200 м. Результаты, полученные с применением этого алгоритма разметки, были использованы для расчета временных рядов потока $ETav_{j,k}^{DM-KD}$ по следующему выражению:

$$ETav_{j,k}^{DM-KD} = \frac{\sum_{i=1}^{i=9} ETav_{j,i} \cdot S_{j,i}^k \cdot Ir_{j,i}^k}{\sum_k S_{j,i}^k \cdot Ir_{j,i}^k}, \quad (4)$$

где $S_{j,i}^k$ - площадь i -го пикселя, попавшей внутрь k -го контура ДМ-КД j -го года, $Ir_{j,i}^k$ - индекс соответствия одному из двух подвидов пахотных земель – $Ir_{j,i}^k = 1$ в случае ОПЗ и $Ir_{j,i}^k = 0$ в случае НПЗ.

Для оценки региональных характеристик потока орошаемых $ETav^{OP3}$ и неорошаемых $ETav^{HP3}$ пахотных земель по следующим выражениям для j -го года были рассчитаны объемы суммарного испарения $vETav_j^{OP3}$ за оросительный период j -го года, а также соответствующие площади ведения орошения на пахотных землях S_j^{OP3}

$$vETav_j^{OP3} = \sum_k^{K_j} ETav_{j,k}^{DM-KD}, \quad (4)$$

$$S_j^{OP3} = \sum_k^{K_j} S_{j,i}^k Ir_{j,i}^k, \quad (5)$$

где K_j – количество контуров ДМ-КД, идентифицированных в j -ом году.

Аналогичные характеристики подвида ЗП $vETav_j^{HP3}$ (суммарный объем испарения за оросительный период) и S_j^{HP3} (площадь ведения неорошаемого земледелия) j -го года были рассчитаны по следующим выражениям

$$vETav_j^{HP3} = \sum_i^{I_{HP3}} ETav_{j,i} \cdot S_{j,i} \cdot Ir_{j,i} - vETav_j^{OP3}, \quad (6)$$

$$S_j^{HP3} = S_j^{OP3} - \sum_i^{I_{HP3}} S_{j,i} \cdot Ir_{j,i} - vETav_j^{OP3}, \quad (7)$$

Результаты анализа мер ЦТиР потоков $ETav$, соответствующих ОПЗ и НПЗ (соответственно $ETav^{OP3}$ и $ETav^{HP3}$), полученные посредством усовершенствованного РАГеоД, представлены на рисунке 6 в виде диаграмм рассеяния.



Рисунок 6 - Диаграммы рассеяния потоков $ETav$ подвидов ЗП: а) ОПЗ; б) НПЗ

На заключительном шаге с использованием размеченных пикселей, соответствующих одному из двух подвидов ЗП «пахотные земли», по следующим выражениям были рассчитаны наборы потоков орошаемых $ETav^{OP3}$ и неорошаемых $ETav^{HP3}$ пахотных земель.

$$\overline{ETav_j^{OP3}} = \frac{vETav_j^{OP3}}{S_j^{OP3}}, \quad (8)$$

$$\overline{ETav_j^{HP3}} = \frac{vETav_j^{HP3}}{S_j^{HP3}}, \quad (9)$$

Представленные на рисунке 7 результаты расчетов региональных объемов суммарного испарения $vETav^{OP3}$ и $vETav^{HP3}$, а также соответствующие интенсивности этих потоков, рассчитанных по формулам (4-9) за 2003–2017 гг., свидетельствует о влиянии природных (динамика погодных характеристик) и антропогенных (изменение технологий и методов ведения земледелия и растениеводства, а также инфраструктуры КОС и ПОС).

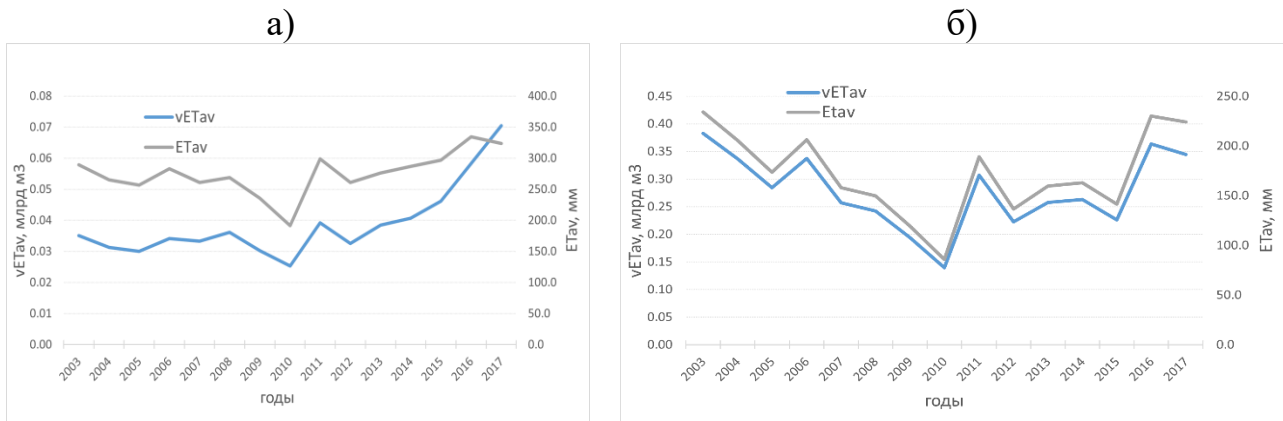


Рисунок 7 – Отображение диаграмм временных рядов объема $vETav$ и среднего по площади потока суммарного испарения $\overline{ETav}$, соответствующих: а) ОПЗ; б) НПЗ

Во втором разделе приведено описание методики разметки по зонам (зонированию) геодатасета $ETav$ с использованием 15 слоев геодатасетов $ETav^{ОПЗ}$ и $ETav^{НПЗ}$ (2003–2017 гг.), а также слоя границ зон с разной удаленностью от уреза левого берега р. Волги (БГ.7). Полученные при этом поднаборы данных были использованы для классификации каждого из этих 15 слоев по принадлежности семи зонам с использованием слоя масок границ этих зон (БГ.7). Для полученных двух наборов геодатасетов, соответствующих ОПЗ и НПЗ, каждый из которых содержал 105 слоев (15×7), были получены статистические характеристики зональных потоков $ETav$, а также построены их профили. Проведенный визуальный анализ рассчитанных профилей позволил выявить ряд значимых закономерностей. Так, анализ характеристик орошаемых $ETav^{ОПЗ}$ пахотных земель привел к выводу об отсутствии значительного уменьшения медианных значений временных рядов всех 6 зон по мере удаления от уреза левого берега р. Волги. В то же самое время аналогичные результаты анализа характеристик неорошаемых $ETav^{НПЗ}$ пахотных земель выявили их существенное прогрессивное уменьшение в таком же направлении. Сочетание этих двух закономерностей выразилось в тенденции прогрессивного увеличения разности между соответствующими значениями этих рядов, что могло быть результатом применения более высоких оросительных норм для компенсации дефицита влагозапасов орошаемых агроценозов по мере их удаления от р. Волги.

Сопоставление региональных и зональных характеристик потока $ETav$, соответствующих обоим подвидам пахотных земель, привело к выводу о формировании в период с 2012 по 2017 годы дополнительных драйверов, приведших к изменению ранее имевших место тенденций. Одним из таких драйверов стали изменения инфраструктуры оросительных систем в результате реализации федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы», направленной на обновление парка дождевальных машин и одновременное расширение клина орошаемых пахотных земель, что подтверждается полученными данными. Другие драйверы, по-видимому, были связаны с изменением состава сельскохозяйственных культур орошаемых севооборотов, а также с изменениями поливных режимов.

В заключении сформулированы основные теоретические и практические результаты работы. Сделан вывод о том, что цель диссертационной работы, заключающаяся в повышении эффективности агрогидрологического мониторинга потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов на основе данных ДЗЗ, была успешно достигнута. При этом подчеркивается, что последующее совершенствование методики оценки региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения позволит применять ее для оценки эффективности орошения, как на уровне отдельного поля и хозяйства, так и оросительных систем в целом, а также для оптимизации режимов орошения, необходимых для получения стабильных урожаев на территории Саратовского Заволжья в условиях аридизации климата.

Приложение включает свидетельства о внедрении результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Представленная диссертационная работа содержит описание и результаты расчетов оценок региональных и зональных характеристик потока суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов за оросительный период, полученных с использованием сформированной базы геоданных и разработанных методов пространственно-временного анализа.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

Проведенный библиографический анализ публикаций, посвященных оценке потока ETa , позволил выявить эффективность методов оценки этого потока по данным ДЗЗ для решения разнообразных теоретических и практических задач на территориях со значительным площадным охватом, в частности, для решения задач агрогидрологического мониторинга, управления водными ресурсами водосборов, при орошении агроценозов.

Применимость данных космического мониторинга потока ETa в виде продукта MOD16A2 была подтверждена результатами его сопоставления с оценками этого потока, полученными в результате наземного полевого мониторинга влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы, реализованного на шести экспериментальных площадках орошаемой люцерны за 2007–2008 гг.

С помощью сформированной базы геоданных базовых и основных геообъектов на территории Марковского района была проведена систематизация геоданных с общим объемом записей порядка 3,6 млн, а также автоматизированы рабочие процессы их обработки, включая: а) наполнение БГД геоданными продукта MOD16A2; б) формирование геодатасета потока суммарного испарения за оросительный период; в) разметку геодатасета $ETav$ по маскам геоданных основных видов землепользования и маскам контуров сельскохозяйственных посевов, орошаемых дождевальными машинами кругового действия, а также зонам различной удаленности от уреза левого берега реки Волги; г) проведение кластерного геопространственного анализа 15 слоев (2003–2017 гг.) геодатасета $ETav$ методом локального индекса Морана и

скоростей тренда двух полупериодов (2003–2010 гг. и 2010–2017 гг.), наборов этого геодасета, соответствующих основным видам землепользования, методом Манн-Кендалла; д) проведение зонального анализа мер центральной тенденции геодасета *ETav* основных видов землепользования, а также двух подвидов пахотных земель — орошаемых и неорошаемых.

С использованием процедур усовершенствованного метода РАГеоД выявлено устойчивое ранжирование временных рядов потока *ETav* основных видов землепользования, заключающееся в увеличении амплитуд межгодовых колебаний от рядов с большими значениями *ETav* (лес, мелколесье, кустарник) к рядам с меньшими значениями этого потока (пашня, неиспользуемые и другие сельскохозяйственные земли), вызванное различиями характеристик надземной и подземной составляющих растительного покрова.

Результаты кластерного анализа слоев геодасета *ETav* и слоев скоростей трендов, рассчитанных по методу Манн-Кендалла, выявили наличие на территориях, соответствующих видам землепользования «лес» и «пахотные земли», паттернов со значительно более высокими значениями *ETav*, а также значительно более низкими скоростями трендов в сравнении с окружающими территориями. Формирование такого рода паттернов на территориях, занятых пахотными землями, могло иметь место при ведении на их части орошаемого земледелия, что было подтверждено сопоставлением мест расположения этих паттернов с контурами слоев контуров дождевальных машин кругового действия.

Обобщение результатов анализа региональных характеристик потока *ETav*, полученных с использованием усовершенствованного метода РАГеоД, привело к выводу о влиянии экономических условий ведения орошаемого земледелия, которые изменились после начала реализации ФЦП «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы», позволившей на льготных условиях модернизировать дождевальную технику. Соответствующие результаты нашли свое отражение в постепенном увеличении разницы между потоками *ETav* орошаемых и неорошаемых агроценозов на региональном и зональном уровнях, что было вызвано изменением поливного режима в сторону увеличения оросительных норм, а также улучшением эффективности поливов за счет уменьшения потерь поливной воды на поверхностный и почвенно-грунтовый сток.

Результаты корреляционного анализа, выявившие тесную линейную связь между урожайностью девятнадцати орошаемых посевов люцерны второго года вегетации со сформированными на них потоками *ETav*, рассчитанными по TIR данным MODIS, позволили прийти к выводу о возможности использования значений этих потоков в качестве предикторов урожайности этой культуры при орошении.

Результаты корреляционного анализа региональных характеристик потока *ETav* орошаемых и неорошаемых пахотных с нормами летних осадков выявили в обоих случаях отрицательные корреляционные связи. При этом в случае неорошаемых пахотных земель выявленная линейная корреляционная связь имела невысокий уровень достоверности, что объясняется, как значимым пространственным варьированием мест расположения соответствующих агроценозов, так и видов выращиваемых сельскохозяйственных культур. В

случае же орошаемых пахотных земель обе выявленные корреляционные связи (линейная и параболическая) имели высокий уровень достоверности, что объясняется ведением орошения агроценозов в соответствии с нормами выпадающих осадков.

Результаты зонального анализа характеристик потока ET_{av} орошаемых пахотных земель выявили слабую вариацию средних и медианных значений по мере удаления от уреза левого берега р. Волги. В то же самое время аналогичные результаты для неорошаемых пахотных земель, выявили существенное уменьшение средних и медианных значений потока ET_{av} в указанном направлении. Сочетание выявленных характеристик выразилось в прогрессивном увеличении разности между значениями соответствующих зон удаленности, которое, очевидно, сложилось в результате увеличения применяемых оросительных норм по мере удаления от уреза левого берега р. Волги.

Результаты, представленные в диссертации, свидетельствуют о решении всех поставленных перед соискателем задач, что, в итоге, позволило достичь цели проведенного исследования.

Рекомендации по применению и развитию результатов диссертационного включают:

- а) разработку методов использования данных дистанционного зондирования Земли для оценки урожайности орошаемых агроценозов на локальном уровне;
- б) разработку методов оценки эффективности орошения отдельного агроценоза с использованием данных дистанционного зондирования Земли;
- в) разработку методов оперативного управления орошением агроценозов с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Ермолаева, О. С. Анализ трендов потоков суммарного испарения (за 2003-2017 гг.) по данным продукта MOD16A2 для территории Марковского района Саратовской области / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 16-25.
2. Ермолаева, О. С. Классификация и зонирование потоков суммарного испарения за вегетацию для территории Марковского района Саратовской области, полученных по данным продукта MOD 16 ET в 2003-2017 гг / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 4. – С. 83-88.
3. Ермолаева, О. С. Эффективность использования посевами орошаемой люцерны запасов почвенной влаги / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Мелиорация и водное хозяйство. – 2023. – № 2. – С. 23-29.
4. Зейлигер А.М. Анализ пространственного варьирования влажности почвенного покрова вдоль фронта дождевальная машины / А. М. Зейлигер, С. В. Затицацкий, О. С. Ермолаева, Д. А. Колганов // Природообустройство. – 2023. – № 3. – С. 15-22.

Статьи в международных базах данных Scopus/WoS

1. Музылев, Е. Л. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий / Е. Л. Музылев,

З. П. Старцева, А. Б. Успенский [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 6. – С. 108-136.

2. Музылев, Е. Л. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона / Е. Л. Музылев, З. П. Старцева, А. М. Зейлигер [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 44-60.

3. Зейлигер, А.М. Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева, Е. Л. Музылев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 33-43.

4. Зейлигер, А.М. Полевое тестирование метода картографического моделирования влагозапасов поверхностного слоя почвенного покрова, основанного на данных радарной съёмки Sentinel-1 и цифровой модели рельефа / А. М. Зейлигер, К. В. Музалевский, Е. В. Зинченко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 113-128.

5. Zeyliger, A. M. Water stress regime of irrigated crops based on remote sensing and ground-based data / A. M. Zeyliger, O. S. Ermolaeva // Agronomy. – 2021. – Vol. 11, No. 6.

6. Zeyliger, A. Results of the Analysis of Water Stress Regimes for Irrigated Crops Based on Remote Sensing Data / A. Zeyliger, O. Ermolaeva, D. Antonov [et al.] // Advances in Science, Technology and Innovation. – 2022. – No. 6/н. – P. 319-322.

7. Zeyliger, A. M. Assessment of Irrigation Efficiency by Coupling Remote Sensing and Ground-Based Data: Case Study of Sprinkler Irrigation of Alfalfa in the Saratovskoye Zavolgje Region of Russia / A. M. Zeyliger, O. S. Ermolaeva, V. V. Pchelkin // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – P. 2601.

8. Zeyliger, A. Mapping Soil Surface Moisture of an Agrophytocenosis via a Neural Network Based on Synchronized Radar and Multispectral Optoelectronic Data of SENTINEL-1,2-Case Study on Test Sites in the Lower Volga Region / A. A. Zeyliger, K. Muzalevskiy, O. Ermolaeva [et al.] // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – P. 9606.

9. Зейлигер, А.М. Сегментирование потока суточного суммарного испарения орошаемого производственного посева сои по модели METRIC и данным Landsat-8 / А. М. Зейлигер, А. В. Доброхотов, О. С. Ермолаева, Я. С. Котов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 99-119.

Статьи в научных сборниках

1. Зейлигер, А. М. Информационные технологии в мониторинге богарных и орошаемых агроценозов / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 10-1. – С. 62-66.

2. Ермолаева, О. С. Пространственно-временные тренды суммарного испарения с подстилающего слоя по данным MODIS за период 2002-2019гг. на территории Марковского района Саратовской области / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11–15 ноября 2019 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2019.

3. Ермолаева, О. С. Пространственно-временная дифференциация потоков суммарного испарения вегетационного периода по типам землепользования на примере территории Марковского района Саратовской области / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» : Электронный сборник материалов конференции, Москва, 16–20 ноября 2020 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2020.

4. Ермолаева, О. С. Интеллектуальный анализ актуальных потоков суммарного испарения с территории Марковского района Саратовской области / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Доклады ТСХА, Москва, 02–04 декабря 2020 года. Том ВЫПУСК 293 Часть II. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 234-236

5. Ермолаева, О. С. Кластерный анализ картограмм трендов потоков суммарного испарения за 2003-2017 г. на территории Марковского района Саратовской области / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 15–19 ноября 2021 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2021. – С. 346.

6. Ермолаева, О. С. Результаты анализа потоков суммарного испарения орошаемых и орошаемых агроценозов на территории Марковского района Саратовской области за оросительные периоды 2003-2017 г. с использованием продукта MOD16A2 / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13–17 ноября 2023 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023.

7. Ермолаева, О. С. Идентификация орошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли с применением методов машинного обучения / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер, Д. А. Буравчиков // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11–15 ноября 2024 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023.

8. Ермолаева, О. С. Оценка пространственного варьирования урожайности орошаемых посевов сои (2023 г) с использованием наборов геоданных пробных укосов и суммарного испарения по модели METRIC (Landsat 8-9) / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер, Д. А. Колганов, А.В. Дорохотов // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11–15 ноября 2024 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023.

Свидетельства о государственной регистрации объектов интеллектуальной собственности

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621331 Российская Федерация. Пространственные характеристики потоков суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агрофитоценозов с сельских территорий : № 2023621052 : заявл. 21.04.2023 : опубл. 26.04.2023 / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682426 Российская Федерация. «Программа для расчета растровых слоев влажности поверхностного слоя почвенного покрова» : № 2023681458 : заявл. 18.10.2023 : опубл. 25.10.2023 / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер, А. В. Греченева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684252 Российская Федерация. «Программа автоматической идентификации орошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли с применением методов машинного обучения» : № 2024683533 : заявл. 09.10.2024 : опубл. 16.10.2024 / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева, А. В. Греченева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».