

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАР
СТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА)

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук,
кандидат технических наук
Зейлигер Анатолий Михайлович

Москва — 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И КЕЙСОВ ОЦЕНКИ ПОТОКА АКТУАЛЬНОГО СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ.....	15
1.1. Введение в первый раздел диссертационного исследования.....	15
1.2. Локальные (точечные) методы оценки потока ETa	18
1.3. Пространственные методы оценки потока ETa по данным дистанционного зондирования Земли.....	27
ГЛАВА 2. БАЗА ГЕОДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАРКОВСКОГО РАЙОНА САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЗРЕЗЕ ЗАДАЧ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	37
2.1. Природно-географическая характеристика Саратовской области и Марковского района, расположенного на ее территории	39
2.2. Методика формирования базы геоданных характеристик территории Марковского района.....	46
2.3. Слои базовых пространственных объектов базы геоданных Марковского района	47
2.3. Слои основных геообъектов базы геоданных Марковского района	57
2.4. Характеристики гидрометеорологического мониторинга станции г. Ершов	67
2.5. Полевая верификация оценки потока актуального восьмидневного суммарного испарения $ETa8$	76
ГЛАВА 3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОДАТАСЕТА $ETav$ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСТЕНТА СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ МАРКОВСКОГО РАЙОНА (2003–2017 ГГ.).....	84
3.1. Методика формирования геодатасета потока актуального суммарного испарения за оросительный период $ETav$	85
3.2. Методика анализа характеристик геодатасета $ETav$	86

3.3	Статистический анализ геодатасета ET_{av}	87
3.4.	Геостатистический анализ геодатасета ET_{av}	96
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ И ЗОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ET_{av} ОРОШАЕМЫХ И НЕОРОШАЕМЫХ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ТЕРРИТОРИИ МАРКСОВСКОГО РАЙОНА		106
4.1.	Региональный анализ характеристик потоков ET_{av} орошаемых и неорошаемых пахотных земель	107
4.2.	Оценка зональных характеристик потока ET_{av} орошаемых и неорошаемых пахотных земель	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		137
ПРИЛОЖЕНИЕ А		160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		164
ПРИЛОЖЕНИЕ В		170
ПРИЛОЖЕНИЕ Г		172

ВВЕДЕНИЕ

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 [225] Всемирного экономического форума по оценке глобальных рисков [245] и Римской декларации по всемирной продовольственной безопасности» [209].

В Российской Федерации продовольственная безопасность является одной из главных целей экономической и аграрной политики государства, что зафиксировано Указом Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 “Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации” [54], следующие пункты которого соответствуют тематике настоящего диссертационного исследования: а) повышение качества жизни российских граждан за счет достаточного продовольственного обеспечения (подпункт "а" пункта 7 части II Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации); б) создание в сельском хозяйстве высокопроизводительного сектора, развивающегося на основе современных технологий и обеспеченного научными работниками и высококвалифицированными специалистами (подпункт "л" пункта 7 части II 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 дефицитом доступных для сельскохозяйственных посевов запасов почвенной влаги [162], характерных

для зон с аридным климатом и дефицитом водных ресурсов [93, 159, 172], а также для зон с периодическими метеорологическими и сельскохозяйственными засухами [124, 145]. Для преодоления ограничений 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 [155, 159, 172], основанные на объективных данных состояния и потребностей сельскохозяйственных растений в воде, получаемых с использованием современных цифровых технологий [24, 30, 51, 61, 69, 72, 157, 167, 190, 219], а также результатов агрогидрологического моделирования процессов энерго- и массопереноса в подстилающем слое атмосферы [156, 185].

Одной из базовых характеристик агрогидрологических моделей является актуальный (фактический) поток суммарного испарения (эвапотранспирации) (ETa), который формируется при переходе почвенной влаги из жидкой фазы в газообразную в результате испарения с поверхности почвенного покрова E_v [221], а также в результате транспирации с поверхности вегетирующего растительного покрова Tr [116, 128], суммарный объем которых в годовом исчислении достигает порядка 60% от суммарного объема выпадающих на поверхность суши осадков [143, 212]. Формирование потоков ETa на сельскохозяйственных землях представляет собой сложный для описания процесс [139], 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 ETa с поверхности суши. 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 технологиям точного орошаемого земледелия

[23]. В этой связи выбор темы настоящего диссертационного исследования вызван актуальной необходимостью, а также практической востребованностью результатов пространственно-временного анализа потока E_{Ta} для целей мониторинга водопотребления орошаемых и неорошаемых пахотных земель.

Степень разработанности темы исследования. Исследования, посвященные оценке локальных характеристик потока актуального суммарного испарения с поверхности суши, в частности агроценозов, по данным измерений на так называемом точечном уровне, представлены в многочисленных публикациях отечественных и зарубежных исследователей, таких как А. М. Алпатьев [2], С. М. Алпатьев [50], Х. Ф. Блейни [100], А. И. Будаговский [5], М. И. Будыко [6], А. И. Голованов [63], Е. М. Гусев [15], Н. Н. Дубенок [18, 65], Н. Н. Иванов [33], А. Р. Константинов [43-45], У. Д. Кридл [100], Г. К. Льгов [47], В. С. Мезенцев [48], А. А. Молчанов [53], Х. Л. Пенман [60], К. Пристли [195], В. В. Пчелкин [66, 249], Г. Т. Селянинов [65], Р. Тейлор [195], Ц. У. Торнтвайт [227, 231], Л. Тюрк [215, 235], Ж. Харгривс [152], А. Ю. Черемисинов [10], Д. Б. Циприс [70], И. А. Шаров [71] и многих других. Однако экстраполяция результатов точечных оценок потока суммарного испарения на площадной уровень приводит к значительным неопределенностям. В связи с этим для решения подобных задач применяются подходы и методы, основанные на данных дистанционного зондирования Земли. Оценке характеристик потока суммарного испарения на площадном уровне посвящены работы Р. Аллена [88-90, 210], В. Бастиаансена [80-81, 99, 213], Дж. Мецикальски [79, 125], Е. Л. Музылева [34-36], Й. Нормана [79, 188], З. Су [208, 222], М. Тасуми [89, 191, 210, 228], Г. Топпа [232-233], Р. Феддеса [141-142] и Я. Янга [91, 201]. Результаты оценки региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов, полученные с помощью дистанционного зондирования Земли, на примере Марковского района Саратовской области приведены в настоящей диссертационной работе.

Объект исследования: пространственно-временные характеристики потока актуального суммарного испарения ET_a 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 исследования: повышение эффективности агрогидрологического мониторинга потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Задачи исследования:

- 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;
- 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;
- 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.;
- 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.

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.

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.

Основные 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.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования 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.

Область исследований. 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.

Апробация работы: Основные положения диссертационной работы были представлены на Международных и Всероссийских конференциях:

1. 14-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, ИКИ РАН, 14–29 ноября 2016 года. (Тема доклада: Компьютерный код оценки эвапотранспирации

агроценозов по данным ДЗЗ). 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).

2. 17-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2019 года. (Тема доклада: Пространственно-временные тренды суммарного испарения с подстилающего слоя по данным MODIS за период 2002-2019г. на территории Марковского района Саратовской области).

3. 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)).

4. III Всероссийская научная конференция с международным участием. Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2021 года. (Тема доклада: Методы, масштабы и данные дистанционного зондирования в моделях роста и развития агрофитоценозов).

5. III Международная научная конференция. Санкт-Петербург, 14–15 сентября 2021 года. (Тема доклада: Кейс пространственной корреляции между урожайностью биомассы посева орошаемой люцерны и влагозапасами почвенного покрова).

6. 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).

7. 18-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16–20 ноября 2020 года. (Тема доклада: Пространственно-временная дифференциация потоков суммарного испарения вегетационного периода по типам землепользования на примере территории Марковского района Саратовской области).

8. 19-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 15–19 ноября 2021 года. (Тема доклада: Кластерный анализ картограмм трендов потоков суммарного испарения за 2003–2017 г. на территории Марковского района Саратовской области).

9. 20-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 14–18 ноября 2022 года. (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).

10. 21-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 13–17 ноября 2023 года. (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).

11. Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 100-летию образования ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова. Москва, 09–11 октября 2024 года. (Тема доклада: Водоэффективность орошения агроценозов: состояние, методы, перспективы).

12. 22-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11–15 ноября 2024 года. (Тема доклада: Идентификация орошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли с применением методов машинного обучения).

13. 22-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11–15 ноября 2024 года. (Тема доклада: Оценка пространственного варьирования урожайности орошаемых посевов сои (2023 г.) с использованием наборов геоданных пробных укусов и суммарного испарения по модели METRIC (Landsat 8–9)).

Результаты диссертационной работы были использованы при реализации следующих грантов:

- 1) Метод оценки эффективности использования продуктивных запасов почвенной влаги на примере орошаемых и неорошаемых посевов сои. РНФ, № 23-27-00438. Руководитель: Ермолаева О. С.
- 2) Картографическое моделирование влагозапасов почвенного покрова на основе комплексной геофизической влагометрии для целей цифрового орошаемого земледелия. РФФИ, № 19-29-05261. Руководитель: Зейлигер А. М.
- 3) Водопотребление агроценозов на "точечном" и "площадном" уровнях исследований. РФФИ, № 16–05-01097А. Руководитель: Зейлигер А. М.
- 4) Использование сопряженных данных дистанционного зондирования Земли и наземных обследований для разработки метода контроля за размещением посевов сельскохозяйственных монокультур, РФФИ, № 15-45-01060 р_юг_а. Руководитель: Паштецкий В. С.

Результаты диссертационной работы внедрены:

1. При разработке метода оценки эффективности использования продуктивных запасов почвенной влаги, в рамках работ, выполняемых по проекту РНФ 23-27-00438 Метод оценки эффективности использования продуктивных запасов почвенной влаги на примере орошаемых и неорошаемых посевов сои (Конкурс 2022 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами»);
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 обучающихся магистратуры направления «Прикладная информатика», направленность (профиль) Архитектура систем искусственного интеллекта в ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева.

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.

Публикации по теме исследования. 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 (Приложение Г).

Структура и объем диссертационной 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.

ГЛАВА 1. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И КЕЙСОВ ОЦЕНКИ ПОТОКА АКТУАЛЬНОГО СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

В этой главе в рамках решения 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» представлены результаты библиографического анализа развития методов оценки потока актуального суммарного испарения с земной поверхности суши (ETa) в задачах, связанных с мониторингом составляющих водного баланса и влагозапасов почвенного покрова (ПП) в таких научных направлениях, как гидрология, орошаемое и богарное земледелие, природопользование и природообустройство, землепользование и пр.

1.1. Введение в первый раздел диссертационного исследования

В первом разделе представлены характерные особенности современного этапа развития агрогидрологических исследований, основанных на использовании компьютерного моделирования в системе SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant Почва-Вода-Атмосфера-Растение) и наборов геоданных, получаемых с использованием технологий: а) геоинформационных систем (ГИС); б) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); в) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС); г) искусственного интеллекта (ИИ). Рассмотрены подходы, методы и модели, применяемые для оценок локальных (точечных) и пространственных (площадных) потоков ETa . Предложена классификация, включающая методы, основанные на модели водного баланса корнеобитаемого слоя (КС) ПП, а также методы, основанные на использовании метеорологических, микрометеорологических, биофизических и эмпирических моделей. С использованием этой классификации во втором разделе представлены результаты библиографического анализа методов локальных оценок потоков ETa . В третьем

разделе приведены результаты библиографического анализа методов пространственных оценок потоков ETa , основанных на результатах ДЗЗ. В этой связи рассмотрены существующие виды сенсорных систем космического базирования, 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 потоков ETa для решения ряда задач в области агрогидрологических исследований, связанных с мониторингом и управлением орошаемыми агроценозами. В частности, приведены результаты сопоставления оценок потоков ETa , полученных по ряду моделей, а также анализа их достоинств и недостатков. В заключении представлены аргументы о целесообразности применения пространственных оценок потоков ETa , основанных на ДЗЗ, в контексте диссертационного исследования.

1.1.1. Агрогидрологический подход к исследованиям водного баланса почвенного покрова и потоков ETa на сельскохозяйственных землях

Значительная часть антропогенной деятельности, связанной с управлением агроценозами, направлена на формирование и эффективное управление запасами почвенной влаги в корнеобитаемом слое (КС) ПП, необходимых для получения запланированных урожаев [230]. В этой связи количественное описание потоков воды в SWAP-системе представляет собой раздел дисциплины гидрологии суши, называемый агрогидрологией, который ориентирован на моделирование влияния составляющих водного баланса (ВБ) КС-ПП агроценозов, а также влияния его приходных и расходных статей на урожайность агроценозов и характеристики окружающей среды, в частности, на поверхностные, грунтовые и подземные водные объекты [124, 155, 159, 162, 190]. Получаемые при этом результаты агрогидрологического моделирования находят свое применение в мониторинге агроценозов, планировании и управлении запасами почвенной влаги в орошаемом земледелии, а также контроле реализации поливов [16, 18, 24, 30, 51, 61, 72].

1.1.2. Междисциплинарный характер агрогидрологических исследований водного баланса и влагозапасов корнеобитаемого слоя почвенного покрова

Основу агрогидрологического направления в исследованиях процессов формирования статей водного баланса, а также запасов почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвенного покрова составляет комплекс гео-, гидро- и биофизических методов, пространственная разрешающая способность которых лежит в широком диапазоне, от уровня почвенных пор [78] до уровня водосборов [180], с присущими этим уровням особенностями ведения мониторинга [218]. Формирование связей между этими уровнями базируется на теории иерархических систем [49], проекция которой на агрогидрологию выражается в непрерывном развитии междисциплинарных методов, применяемых в ландшафтоведении [17], почвоведении [38, 41], физике почв [11, 12, 52], гидрологии суши [4, 9, 46] и др., а также в совершенствовании моделей водного баланса КС-ПП, основанных на использовании данных из разных источников с различными пространственным и временным разрешением [90]. Это позволяет расширять и углублять междисциплинарные знания в гидрологии суши [4, 9, 46], метеорологии и агрометеорологии [90], почвоведении [38, 41], физике почв и геофизике [11, 12, 52, 190], земледелии и растениеводстве [121, 173, 182, 218, 232, 233]. Получаемые при этом новые знания трансформируются в инновационные методы и технологии развития орошаемого земледелия [118, 247] [48, 49], мониторинга земельных ресурсов [90, 182], а также точного земледелия [85, 151, 101].

1.1.3 Современный этап развития агрогидрологических исследований водного баланса корнеобитаемого слоя почвенного покрова

Современный этап агрогидрологических исследований характеризуется развитием совместного применения ряда традиционных наземных методов мониторинга водного баланса КС-ПП [97, 196, 98] и мониторинга составляющих

потока ETa [34, 42] с использованием сочетания отмеченных выше четырех цифровых технологий ГИС-ДЗЗ-ГНСС-ИИ [26, 27]. Эффективность применения этого сочетания для пространственно-временной параметризации агрогидрологических моделей и получаемых с их помощью результатов моделирования [251] связана с координатной привязкой пространственно-временных наборов данных (геоданных, геодатасетов) мониторинга в исследуемый интервал времени на географическом экстенде исследуемого пространственного объекта (геобъекта).

В агрогидрологических исследованиях различных уровней используется широкий спектр соответствующих им моделей. Так для уровня водосбора используются модели т. н. семейства SWAT (Soil-Water-Atmosphere-Transfer) [95, 111, 146, 164, 170, 226], а также семейства LS (Land-Surface) [111, 117]. На уровне агроценоза широко используются модели семейства SWAP [15, 86, 141, 142, 207, 250]. Одной из основных характеристик моделей этих семейств, во многом определяющей агрогидрологическое состояние и поведение агроценоза, является поток ETa . Применяемые в настоящее время методы оценки потока ETa в соответствии с пространственным разрешением используемых в них данных представлены: а) локальными (точечными) методами; б) пространственными (площадными) (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Классификация методов оценки потока ETa

1.2. Локальные (точечные) методы оценки потока ETa

В гидрологии суши формирование потока ETa рассматривается в качестве непрерывного физического процесса с пространственно-распределенными

характеристиками, оцениваемыми по данным мониторинга [26, 34]. В связи с этим при анализе методов мониторинга потока ETa важное значение имеют обеспечиваемые ими пространственное разрешение, а также повторяемость.

1.2.1. Классификация методов локальной (точечной) оценки потока ETa

В целях упорядочивания представления результатов библиографического анализа методов, используемых для локальной (точечной) оценки потока ETa , эти методы были разделены на три основные группы: 1) аппроксимационные и эмпирические; 2) градиентные микрометеорологические; 3) прямые микрометеорологические (рисунок 1.2).

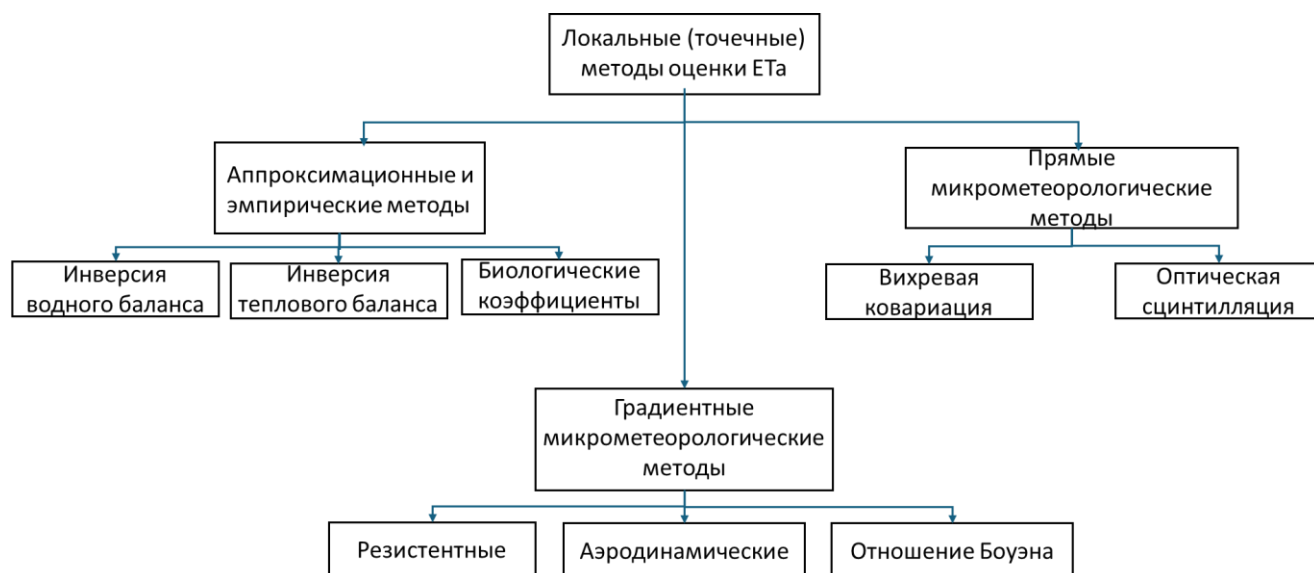


Рисунок 1.2 – Классификация локальных (точечных) методов оценки потоков ETa

1.2.2. Аппроксимационные и эмпирические методы оценки потока ETa

Методы оценки потоков ETa , объединенные в группу аппроксимационных и эмпирических методов, имеют высокое разнообразие в связи с использованием разных подходов.

Инверсия уравнения водного баланса. Исторически сложилось, что первые методы оценки потока ETa , были основаны на т. н. инверсии уравнения водного баланса (ВБ). В свое время эти методы обеспечивали потребности проводимых

гидрологических и агрогидрологических исследований в данных мониторинга [44, 154]. Для их реализации были разработаны методы т. н. отрывных и неотрывных почвенных лизиметров/монолитов, которые нашли свое широкое практическое применение. Их известными примерами могут служить: а) гидравлический испаритель с площадью почвенного монолита 5 м² и глубиной 2 м, установленный на территории Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории (ВНИГЛ) [44]; б) неотрывные лизиметры на опытной сельскохозяйственной станции Бушленд в Техасе, США [216]. За многолетний период применения почвенных лизиметров было показано, что получаемые с их помощью данные во многих случаях адекватно воспроизводят статьи водного баланса на близко расположенных к ним агроценозах [44]. Это позволило использовать лизиметрические методы в качестве базовых для режимных исследований потока ET_a в различных по условиям почвенно-климатических зонах [216], а также принять метод инверсии водного баланса в качестве эталона для верификации других методов измерений, в частности методов, основанных на ДЗЗ [113, 216]. Соответствующая методика расчета потока ET_a основана на использовании инвертированного уравнения ВБ расчетного слоя ПП [193, 236, 246], которое для интервала между соседними измерениями в интервалах между соседними измерениями имеет следующий вид [80–82].

$$ET_{a,i} = P_i + M_i + W_{i+1} - W_i + q_i \uparrow + q_i \downarrow, \quad (1.1)$$

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.

Для получения временных рядов запасов почвенной влаги в случае отрывных почвенных монолитов используют периодическое взвешивание, а в случае неотрывных – периодическое измерение влажности слоев ПП. Во втором случае, до начала 1960-х годов, соответствующие измерения проводились с использованием проб почв, отбираемых из монолитов для их последующего

гравиметрического анализа с помощью термостатно-весового метода. В последующем, по мере развития новых технологий, стали применять методы косвенного измерения влажности почв с использованием, или стационарно установленных внутри лизиметров датчиков, или датчиков, перемещаемых внутри установленных в них обсадных труб. В целом, несмотря на сложности с установкой датчиков влажности почв в монолитах и их обслуживанием, а также необходимостью проведения соответствующей калибровки [122, 123], их применение позволило существенно снизить трудоемкость мониторинга влагозапасов [29, 32, 37, 161, 192, 244]. Несмотря на это, использование лизиметрических методов с использованием датчиков влажности все еще требует значительных затрат на их установку и обслуживание, что препятствует разворачиванию на их основе сетевых измерений [106, 221].

Инверсия уравнения теплового баланса. В методах расчета потока ET_a , основанных на инверсии теплового (энергетического, радиационного) баланса подстилающего слоя атмосферы, используется следующее выражение [6]:

$$ET_a = \frac{(Rn - G - H)}{L}, \quad (1.2)$$

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.

Методы решения уравнения (1.2) позволяют рассчитывать поток ET_a в случаях мониторинга с короткими временными отрезками, в связи с чем их достаточно часто используют при проведении локальных полевых исследований [5, 45, 48]. Для интерпретации их результатов используют или метод энергетического баланса Боуэна [217], или методы, основанные на теории подобия Монино-Обухова [102] с использованием градиентов температуры, влажности воздуха, а также скорости ветра [6]. Однако, применение этих методов на уровне отдельного агроценоза сталкивается с высоким пространственным варьированием

измеряемых параметров, что в большинстве случаев приводит к значительным неопределенностям оценки потока ET_a .

Метод Пенмана-Монтейна и его модификации. В настоящее время наиболее распространенный подход по оценке потока ET_a агроценозов основан на применении уравнения теплового баланса с использованием коэффициента суммарного испарения сельскохозяйственных культур

$$ET_a = K_c \cdot ETP, \quad (1.3)$$

где ETP – потенциальное суммарное испарение, зависящее только от стандартных метеорологических характеристик [18, 116]; K_c – коэффициент суммарного испарения сельскохозяйственных культур, зависящий от фенологической фазы и уровня водного стресса.

На основе этого подхода был разработан ряд методов, одним из которых является метод Пенмана-Монтейна (ПМ) [60, 184, 217]. Соответствующее выражение метода ПМ, являющегося одной из разновидностей метода инверсии теплового баланса, имеет следующий вид:

$$ET_0 = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \Delta e \cdot q_a}{(\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{q_a}{q_s})) \cdot L}, \quad (1.4)$$

где ET_0 – базальный поток суммарного испарения, мм/сут; R_n – суточный радиационный баланс, Вт/м²; G – плотность теплового потока в почвенный покров, Вт/м²; Δ – скорость изменения насыщения удельной влажности, как функции температуры воздуха, Па/К; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; c_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); Δe – дефицит давления паров, Па; q_a – импульс аэродинамической поверхностной проводимости, м/с; L – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; γ – психрометрическая постоянная, Па/К, q_s – скорость испарения водных масс, г·с/м².

Результаты расчетов, получаемые по модели (1.3–1.4), проходили многочисленные проверки с использованием данных, получаемых с помощью метода почвенных лизиметров и метода Боуэна, а в последние годы также и с помощью методов вихревой ковариации и оптической сцинтилляции. Эти результаты показали высокую достоверность получаемых оценок потока ET_a на

локальном уровне [109, 165]. Это нашло свое отражение в принятии модели (1.3–1.4) в качестве стандартной, известной, как модель FAO-56 [88, 103]. В то же самое время для территорий с редким покрытием метеорологическими станциями были разработаны модели, содержащие меньшее число метеопараметров. Среди этих моделей отметим модель Харгривза-Самани (ХС) [152] и модель Пристли-Тейлора (ПТ) [195], эмпирические коэффициенты которых зависят от места проведения экспериментов, что требует их локальной калибровки [215]. Отсутствие же в этих моделях параметров, связывающих поток ET_0 с давлением водяного пара и скоростью ветра, приводит к получению более низких значений этого потока в сравнении с моделью ПМ [215], в частности в регионах с засушливым климатом.

Эмпирические модели. Помимо моделей ПМ, ХС и ПТ, представленных выше, для оценки потока ET_0 с целью потребностей агрофитоценозов в воде был разработан целый ряд нижеприведенных эмпирических моделей, основанных на уравнении (1.3).

Модель Тюрка [215, 235], связывающая декадное потребление воды сельскохозяйственных культур в воде (водопотребление) со средними за декаду температурой воздуха и притоком коротковолновой радиации:

$$E_{\Phi}^{10} = 0,13 \frac{t}{t+15} (i + 50), \quad (1.5)$$

где E_{Φ}^{10} – потребность агрофитоценоза в воде за декаду, мм; t – средняя за декаду температура воздуха, °C; i – средний за декаду приток коротковолновой радиации, кал/(см²·день).

Модель Блени–Криддла [100, 144], связывающая месячное водопотребление сельскохозяйственных культур со среднемесячной температурой воздуха:

$$E_{\Phi}^{30} = 25,4 \frac{KP \cdot (18 \cdot t + 32)}{100}, \quad (1.6)$$

где E_{Φ}^{30} – месячная потребность агрофитоценоза в воде, мм; K – параметр, значение которого зависит от вида сельскохозяйственных культур; P – продолжительность часов дневного времени в долях от годовой их суммы, %; t – среднемесячная температура воздуха, °C.

Модель Шарова [71] связывающая водопотребление сельскохозяйственных культур за вегетацию за вегетационный период со среднесуточными значениями температуры и влажности воздуха:

$$E_{\phi}^{\text{вер}} = e \cdot \Sigma t + 4 \cdot a, \quad (1.7)$$

где $E_{\phi}^{\text{вер}}$ – суммарное водопотребление агроценоза за вегетационный период, м³/га; e – модуль испарения, м³/(га·°C); Σt – сумма среднесуточных температур воздуха в течение вегетационного периода, °C; a – число дней вегетационного периода.

Модель Льгова [47], аналогичная модели Шарова, была получена для условий Северного Кавказа в следующем виде:

$$E_{\phi}^{\text{вер}} = 1,88 \Sigma t, \quad (1.8)$$

где $E_{\phi}^{\text{вер}}$ – суммарное водопотребление за вегетационный период, мм; Σt – сумма среднемесячных температур воздуха за расчетный период, °C.

Для оценки суммарного испарения с водной поверхности (испаряемости) Ивановым [33] была предложена модель, основанная на данных экспериментов на испарителях для условий зоны неустойчивого увлажнения:

$$E_0 = 0,0018 \cdot (100 - f) \cdot (25 + t)^2 \cdot 0,8, \quad (1.9)$$

где E_0 – испаряемость за месяц, мм; f – среднемесячная относительная влажность воздуха, %; t – среднемесячная температура воздуха, °C.

В последствии с целью использования модели Иванова для оценки суммарного испарения агрофитоценозов в ряде работ [53] был введен коэффициент перехода от испаряемости к суммарному водопотреблению. Однако, необходимость эмпирической оценки этого коэффициента для условий конкретного агроценоза явилось существенным ограничением дальнейшего развития соответствующих исследований [184, 244].

Биофизические модели. Отдельным направлением в оценке потока ETa агроценозов являются биофизические методы, основанные на моделях, учитывающих фенологические закономерности роста и развития сельскохозяйственных культур. Одна из таких моделей оценки суммарного водопотребления трех фаз вегетационного периода была предложена Штойко [235]

$$E_{\phi}^{\phi.в.} = \begin{cases} \Sigma t \cdot \left(0,1 \cdot t - \frac{f}{100}\right), \\ \Sigma t \cdot \left(0,1 \cdot t - \frac{(1-f)}{100}\right), \end{cases} \quad (1.10)$$

где $E_{\phi}^{\phi.в.}$ – суммарное водопотребление фазы вегетационного периода, м³/га; Σt – сумма среднесуточных температур воздуха фазы вегетационного периода, °С; t – среднемесячная температура воздуха, °С; f – среднемесячная относительная влажность воздуха, %.

В формуле (1.10) для первого периода, от начала вегетации до полного перекрытия поверхности почвы растительным покровом, и третьего, соответствующего фазе созревания, используется первое выражение, второе выражение применяется для промежуточной фазы, характеризующейся активным водопотреблением. Приведенные впоследствии исследования [50] подтвердили адекватность модели (1.10).

Дальнейшим развитием моделей, учитывающих особенности фенологических фаз сельскохозяйственных культур, послужили работы, в которых использовался параметр дефицита влажности воздуха. Одна из них была предложена А. М. Алпатьевым [45], которая была впоследствии усовершенствована С. М. Алпатьевым [50]

$$E_{\phi}^{р.п.} = K_{\phi} \cdot \Sigma d, \quad (1.11)$$

где $E_{\phi}^{р.п.}$ – суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур за расчетный период, мм; K_{ϕ} – коэффициенты биологической характеристики растений, мм/мбар; Σd – сумма дефицитов влажности воздуха за расчетный период, мбар.

Для развития биофизических моделей оценки водопотребления сельскохозяйственных культур Черемисиновым [10] была предложена модель т. н. биологических характеристик сельскохозяйственных культур, которая была использована в целом ряде практических методик по управлению орошением агроценозов [10, 58, 70].

$$E_{\phi}^{\text{р.п.}} = \frac{E_w \cdot E_{0i}}{E_0}, \quad (1.12)$$

где E_w – ординаты функции водопотребления сельскохозяйственных культур; E_{0i} – испаряемость за расчетный период, зависящая от температуры и влажности воздуха; E_0 – средний сезонный ход условной испаряемости, мм.

Несомненные достоинства биофизических методов оценки водопотребления сельскохозяйственных культур заключаются в их связи с физиологией сельскохозяйственных культур [10, 18, 58, 65, 66, 70], однако для их практического использования требуются данные мониторинга гидрометеорологических сетей с покрытием высокого разрешения [237, 77], а также базы локализованных коэффициентов биофизических характеристик сельскохозяйственных культур.

1.2.3. Градиентные микрометеорологические методы

Следующую группу оценки потоков ETa составляют методы, основанные на градиентах температуры воздуха и его влажности, измеряемых на двух высотах над земной поверхностью. К ним относятся аэродинамические и резистометрические методы, а также метод Боуэна [171, 186, 229, 231]. Этим методам свойственна высокая чувствительность к неоднородностям процессов теплопереноса в местах проводимых измерений, погрешностям датчиков температуры воздуха и давления водяного пара [198].

1.2.4. Микрометеорологические методы измерений потока ETa

В следующую группу микрометеорологических методов оценки потока ETa входят методы, основанные на вихревой ковариации (Eddy Covariance - EC) и оптической сцинтилляции (Optical Scintillation - OC). Эти методы получили широкое распространение в гидрометеорологических и гидрологических исследованиях. При этом первый из этих методов стал базовым для проведения калибрования, верификации и валидации моделей, связанных с процессами переноса водяного пара между приземным слоем атмосферы и подстилающей

поверхностью и [92, 137]. Во многом это стало возможным в связи с проведением параллельных измерений потоков ETa и CO_2 [137], что привело к созданию национальных и международных сетей типа Flux.net [137]. В то же самое время сцинтиллометрический метод, основанный на теории подобия Мони́на-Обухова, является более затратным в сравнении с методом вихревой ковариации в части стоимости оборудования. Приборной составляющей обоих этих методов свойственна высокая требовательность к однородности участков их установки [82], а также чувствительность к различного рода шумам, которые вызываются выпадением осадков, туманом, насекомыми, а также различного рода загрязняющими веществами, находящимися в воздухе [107, 211]. Эксплуатация же приборов, применяемых в обоих этих методах, требует привлечение специалистов высокой квалификации, что в ряде случаев препятствует их использованию для решения локальных задач.

1.3. Пространственные методы оценки потока ETa по данным дистанционного зондирования Земли

Непрерывное совершенствование методов и технологий аэрокосмического мониторинга земной поверхности в последние два десятилетия способствовало развитию методов пространственной оценки потока ETa . Это стало возможным благодаря последовательному улучшению характеристик сенсоров, размещаемых на космических платформах, а также созданию наземных сетей вихревой ковариации (Eddy covariance), используемых для валидации методов, основанных на результатах ДЗЗ. В итоге это привело к минимизации шумов в результатах наблюдений, а также позволило вести целенаправленное совершенствование моделей оценки потока ETa по данным ДЗЗ [35].

1.3.1. Сенсорные системы космического мониторинга потока ETa

Отмеченное выше развитие использования результатов ДЗЗ для пространственной оценки потока ETa привело к формированию покрытий этого параметра с низким, средним и высоким пространственным разрешением,

характеристики которых зависят от параметров сенсоров, размещаемых на платформах космических аппаратов (КА), а также от повторяемости проведения съемок. Получаемые при этом покрытия:

а) низкого разрешения с разрешением пикселей порядка нескольких километров и высокой периодичности порядка часов, используются в гидрологических исследованиях глобального уровня [36, 201];

б) среднего разрешения с разрешением пикселей порядка нескольких сотен метров и с суточной повторяемостью используются на региональном уровне [36, 201];

в) высокого разрешения с разрешением пикселей порядка десятков метров, а также повторяемостью порядка нескольких суток используются в задачах локального уровня [42, 62, 94, 120, 206].

Текущее совершенствование методов оценок потока *ETa* основано на использовании результатов съемки тепловыми сенсорами инфракрасного диапазона излучения (TIR), размещенными на ряде космических платформ [166], а также их интеграции с результатами съемки другими сенсорами на ряде космических платформ. Наиболее востребованными являются результаты съемок тепловыми сенсорами КА Landsat (60 – 120 м), ASTER (90 м), MODIS (250 м – 1 км) и GOES (4 км), которые широко применяются для картирования потоков *ETa* при решении задач в области климатологии, гидрологии, экологии, природопользования и природообустройства, а также для контроля и управления орошением агроценозов [24, 134, 136, 153, 183, 201]. В этом контексте появление миссий КА Sentinel-2 и Sentinel-3 европейского космического агентства (ESA) в рамках программы Copernicus (<http://www.copernicus.eu/>), значительно увеличило возможности мониторинга потока *ETa*, а также связанных с ними характеристик урожайности агроценозов на масштабах, требующих более высокого пространственного разрешения, а также более высокой повторяемости съемки [150].

В контексте упомянутого выше мультисенсорного направления разработаны методы увеличения разрешения оценок потоков *ETa*. Эти методы основаны на

совместном анализе данных TIR сенсора SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer, радиометр для измерения температуры поверхности моря и суши) КА Sentinel-3 низкого разрешения (1000 м), а также данных видимого и ближнего инфракрасных диапазонов сенсоров VIS-NIR КА Sentinel-2 высокого пространственного разрешения (20 м), в результате которого достигается улучшение разрешения данных измерения температуры земной поверхности (Land Surface Temperature - LST) сенсора КА Sentinel-3 [181].

1.3.2. Связь потоков *ETa* с характеристиками подстилающего слоя

Выше было отмечено, что основу методов оценок потока *ETa* по данным ДЗЗ составляют модели оценки характеристик почвенного и растительного покровов по результатам аэрокосмической мультиспектральной съемки. Развитие этих методов ведется на основе теоретических и методических исследований, связанных с гидрологией суши, и, в частности, с агрогидрологией, что делает возможным использование получаемых результатов для совершенствования технологий мониторинга, управления и контроля орошения агроценозов [24, 110, 149, 158, 179, 204, 205, 244, 249]. Одна из важных задач такого рода исследований связана с использованием пространственно-временных наборов данных потока *ETa* для территорий с высокой пестротой характеристик почвенного и растительного покровов. Начало решению этой задачи было положено в 1990-х годах в исследованиях, проведенных на относительно небольших по площади участках земной поверхности суши [24, 89, 99, 114, 130, 177, 188, 191, 203]. Их последовательное развитие позволяет в настоящее время получать адекватные оценки потока *ETa* со средним пространственным разрешением и высокой повторяемостью практически на всей поверхности суши с разнообразным растительным и почвенным покровом [188, 191, 203], что делает их эффективным средством для мониторинга водного и теплового режима орошаемых и неорошаемых агроценозов.

1.3.3. Модели оценки потока ETa по данным дистанционного зондирования Земли

Наиболее распространенные в настоящее время модели оценки потока ETa по данным ДЗЗ классифицируются по числу источников их формирования (рисунок 1.3). Так в моделях с одним источником описывается формирование одного потока ETa , в то время как в моделях с двумя источниками, описываются два его составляющих – испарение с поверхности почвенного покрова (Ea) и транспирация с поверхности растительного покрова (Tra).

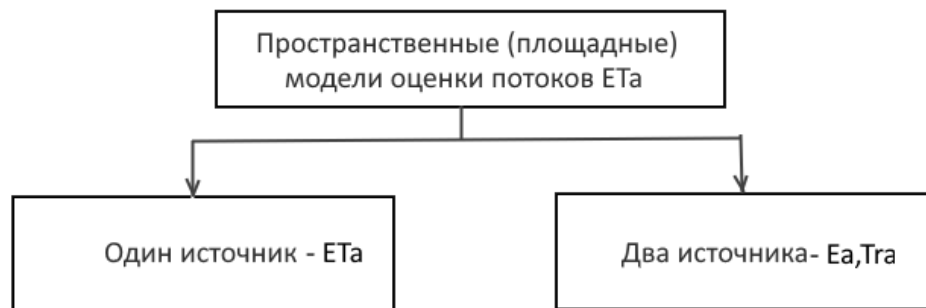


Рисунок 1.3 – Классификация пространственных (площадных) моделей оценки потока ETa по данным ДЗЗ

Среди моделей с одним источником потока ETa , основанных на решении уравнений энергетического баланса для совокупности почвенного и растительного покрова, наиболее известными являются, такие модели, как SEBS [222], SEBAL [80, 81, 213], S-SEBI [208] и METRIC (с калиброванием на основе решения обратной задачи по методу CIMEC) [210, 228], TSEB [188], ALEXI [125], DISALEXI [79], DTD [223], ETEML [91]. Эти модели широко используются, как в научных исследованиях, так и при решении практических задач. Так, для анализа засухи 2018 г. на северной и южной частях Европейского континента и идентификации соответствующих паттерн потоков ETa , были использованы наборы архивных данных восьмисуточного покрытия продукта MOD16 ET [75], непрерывно формируемого по результатам космосъемки спектрорадиометра КА MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), размещенного на космической платформе Terra. Использование данных этого продукта позволило

выявить значимое уменьшение потока ETa в районах с экстремально высокими аномалиями температур и низкими нормами дождевых осадков, а также существенно большее снижение потока ETa на контурах агрофитоценозов в сравнении с контурами, покрытыми естественной растительностью.

В исследовании, реализованном в 2016 г. на территории водосбора р. Кай-Конг, расположенном в засушливом Синьцзян-Уйгурском регионе Китая [108], было проведено сопоставление потоков ETa агроценозов, рассчитанных по модели SEBAL с использованием данных КА Landsat 7,8 с аналогичными потоками, рассчитанными по данным гидрометеорологического мониторинга с использованием модели Пенмана-Монтейна (1.2). В результате было показано удовлетворительное согласование обоих рядов в течение ряда вегетационных периодов с отличными друг от друга погодными условиями.

В исследовании, проведенном в 2018 – 2019 гг. в девяти регионах интенсивного орошаемого земледелия, расположенных на территории водосбора р. Биг-Хорн (штат Вайоминг, США) [197], значение потока ETa орошаемых посевов сахарной свеклы, фасоли и ячменя были рассчитаны по модели METRIC с использованием данных прибора MODIS КА Terra, Их сопоставление с соответствующими потоками ETa , рассчитанными по методу Боуэна с использованием данных гидрометеорологического мониторинга, показало их незначительное отличие, лежащее в пределах 3–6%.

В исследовании, проведенном в 2017–2019 гг., на орошаемых агроценозах штата Вайоминг (США) [84], при сопоставлении значений потока ETa , рассчитанных по четырем моделям семейства SEB - SEBAL, METRIC, S-SEBI и SEBS, были получены результаты с близкими значениями, что в целом согласуются с результатами других аналогичных исследований [74, 160, 200, 243].

В исследовании, проведенном в 2015-2016 гг. на культурных пастбищах, расположенных на юге Великой равнины Северной Америки [112] по модели SEBAL с использованием данных ДЗЗ с пространственным разрешением 30 м, 200 м, 500 м и 1000 м было проведено сопоставление рассчитанных по этой модели значений потока ETa , с его значениями, рассчитанными по данным станций

вихревой ковариации. В результате было выявлено лучшее согласование рядов потока E_{Ta} , рассчитанных по данным с разрешением 30 метров, что подтвердило чувствительность пространственных оценок этих потоков по данным ДЗЗ к влиянию неоднородности растительного и почвенного покрова территории, сопредельной с местоположениями приборов точечного наземного мониторинга.

В свою очередь модели с отдельной оценкой составляющих потока E_{Ta} по данным ДЗЗ семейства TSEB [138] основаны на решении системы уравнений энергетического баланса растительного и почвенного покровов с использованием модели Пристли-Тейлора. Соответствующие исследования с использованием моделей ALEXI [125] и DISALEXI [79] для широкого диапазона ландшафтных и погодных условий [36, 168, 241] позволили продемонстрировать перспективность их использования в задачах мониторинга и управления орошением агроценозов [168, 238, 252].

С целью оценки эффективности совместного использования результатов мониторинга потока E_{Ta} с различных космических платформ в 2012–2016 гг. на агроценозах и естественных пастбищах тестового полигона (водосбор среднего течения р. Хэйхэ, Китай), оборудованного сетью станций вихревой ковариации, были проведены четырехлетние исследования [138, 160]. В этих исследованиях потоки E_a и T_{ra} были рассчитаны по модели TSEB с использованием ежесуточных данных MODIS низкого пространственного разрешения 500 м, КА Landsat 7-9 среднего разрешения 30–60 м и повторяемостью 7–8 суток, а также КА Sentinel 2 среднего разрешения 10–20 м и повторяемостью 5 суток. Полученные результаты продемонстрировали возможность заполнения рядов оценок потоков E_a и T_{ra} между соседними съемками КА среднего разрешения за счет использования утилиты увеличения пространственного разрешения (паншарпенинга) STARFM для получения из растров КА низкого разрешения MODIS растров среднего разрешения.

1.3.4 Цифровые сервисы и продукты мониторинга потока *ETa*

Происходящее в последние десятилетия непрерывное поступление новых результатов ДЗЗ привело к формированию больших по объему архивов геоданных, использование которых в базовых форматах требует значительных ресурсов и времени. Для упрощения этапов поиска необходимых архивных данных ДЗЗ были созданы цифровые продукты и специализированные сервисы. Один из таких сервисов, позволяющий использовать данные ДЗЗ по оценке потока *ETa*, развернут на платформе Google Earth Engine (GEE).

Эффективность использования цифровых продуктов ДЗЗ для решения разнообразных задач анализа и контроля влияния природных и антропогенных процессов на формирование потока *ETa* на землях сельскохозяйственного назначения, включая орошаемые агроценозы, представлена в работах [24, 42, 115, 132, 201]. В работе [147] приведены результаты использования сервиса GEE для идентификации районов с потенциально неустойчивым использованием водных ресурсов на территориях Таиланда, Бразилии и Китая, а также для оценки тренда увеличения потока *ETa* с орошаемых агроценозов и анализа эффективности и устойчивости орошаемого земледелия.

Одним из источников данных для оценки потока *ETa* вышеперечисленных исследований был продукт MOD16A2, наполнение тайлов которого осуществляется в непрерывном режиме с использованием расчетов по модели SEBS [27] на основе данных спектрорадиометра MODIS, размещенного на платформе КА Terra. При этом формируются непрерывные покрытия географического пространства земной суши между 80° с.ш. и 60° ю.ш., основанные на тайлах растровых восьмисуточных значений потоков суммарного испарения (*ETa8*) для каждого из 43 восьмисуточных периодов календарного года. Достоверность продукта MOD16A2 была верифицирована с использованием данных наземного мониторинга сети станций вихревой ковариации за период 2000–2010 гг., расположенных в различных физико-географических зонах [239], с удовлетворительной в пределах 5–10% сходимостью.

Отмеченный выше прогресс в области моделирования потока ETa с поверхности суши на основе данных ДЗЗ способствовал выявлению ряда ограничений как в применяемых методах, так и в получаемых на их основе цифровых продуктах. Одним из таких ограничений является низкая применимость этих данных для условий субтропиков и пустынь [131], а также ограничения, связанные с влиянием облачности, пространственным разрешением и временной повторяемостью съемок сенсорами актуальных КА гражданского назначения.

1.3.5. Практико-ориентированная направленность использования оценок потока ETa по результатам космического мониторинга

Оценки потока ETa , получаемые по результатам ДЗЗ, широко используются в практике водного хозяйства и орошаемого земледелия. В проекте по оценке водного стресса виноградников, реализованном в условиях средиземноморского климата Испании [140], был приведен анализ потоков Ea и Tra , рассчитанных по улучшенной модели TSEB с использованием данных сенсоров Sentinel 2,3 [169, 188]. В результате было показано, что применение улучшенной модели TSEB за счет совместного использования мультисенсорных данных имеет высокий потенциал для управления орошением виноградников в условиях средиземноморского климата.

Сходный результат был получен в производственном эксперименте с использованием капельного орошения виноградника сорта Каберне Совиньон в центральной части Чили [133]. При сопоставлении результатов оценок потока ETa , полученных по двум моделям (METRIC и TSEB) с использованием данных съемок сенсорами КА Landsat 7,8, и данных, полученных в результате наземного мониторинга с использованием станций вихревой ковариации, была получена средняя оценка отклонений (RMSE), составившая 0,52 мм/сут, которая, по мнению авторов, оказалось приемлемой.

Как уже отмечалось выше, одним из ограничений оценок потока ETa по данным ДЗЗ, получаемых с использованием работающих на орбитах КА

гражданского назначения, является недостаточное пространственное разрешение, не позволяющее охарактеризовать влияние водного стресса на характеристики растительного покрова агроценозов с присущей им внутренней пространственной неоднородностью [3, 176]. Для преодоления этого препятствия используются результаты ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения, получаемые сенсорами на воздушных платформах: а) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА); б) пилотируемых летательных аппаратов (ПЛА). Так в работах [105, 187, 242] приведены результаты, позволившие получить требуемое высокое пространственное разрешение для задач, связанных с планированием ведения точного орошаемого земледелия. Сходные результаты по оценке потока ETa и водного стресса сельскохозяйственных растений при капельном орошении представлены в работах [129, 135, 178] для уровня виноградных лоз, а в работе [87] для уровня фруктовых деревьев на плантациях нектаринов и персиков [105].

Результаты оценок потока ETa , получаемые с использованием результатов ДЗЗ, широко используются в задачах управления поверхностными и подземными водными ресурсами в орошаемом земледелии. Так в работе [76] представлены результаты, полученные с использованием модели SEBS и данных КА MODIS для управления поверхностными водными ресурсами на ирригационных системах в бассейне р. Инд, Индия и р. Доаб (Иран) [202], а также для сопоставления водоподачи из головной части канала и забора подземных вод. Примеры использования аналогичных результатов ДЗЗ для управления совместного использования поверхностных и грунтовых вод в орошаемом земледелии представлены в работе [202] для водозаборов, расположенных в среднем течении р. Доаб (Иран) и нижнем течении р. Ченаб (Индия) [127].

Результаты оценок потоков ETa , рассчитанных по данным ДЗЗ, широко используются при решении задач, связанных с водопользованием, а также оценок дефицита водопотребления. Пример решения первой из этих задач в условиях Центральной Азии представлен в работе [175], а второй – для регионов Китая, расположенных в условиях аридного климата [96].

Выводы по первой главе:

1) Результаты проведенного библиографического обзора литературных источников свидетельствуют о значительном разнообразии методов оценки потока актуального суммарного испарения с земной поверхности суши (ETa), которые применяются в гидрологии, физике почв, управлении водными ресурсами и орошаемом земледелии. Эти методы основаны на частных случаях уравнений энергетического и водного баланса подстилающего слоя земной поверхности.

2) С точки зрения площадного охвата, методы оценки потока ETa , были разделены на две группы: точечные, использующие локально размещенную измерительную аппаратуру, и площадные, использующие аппаратуру, размещенную на аэрокосмических платформах. При использовании методов первой группы на объектах со значительным площадным экстендом возникает необходимость экстраполяции их результатов, что приводит к неопределенностям в результате пространственного варьирования характеристик почвенного и растительного покрова. В свою очередь, использование методов второй группы, откалиброванных по данным методов первой группы, позволяет, в зависимости от пространственного разрешения съемочной аппаратуры и варьирования характеристик почвенного и растительного покрова на уровне размеров соответствующих пикселей, получать удовлетворительные результаты.

ГЛАВА 2. БАЗА ГЕОДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАРКОВСКОГО РАЙОНА САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЗРЕЗЕ ЗАДАЧ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей главе приведены результаты анализа природно-климатических характеристик Марковского района (МР), а также результаты формирования слоев базы геоданных (БГД), направленные на решение задачи 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». Результаты применения этих исследований использованы для решения задач 3–4 (рисунок 2.1), которые приведены в Главах 3 и 4 соответственно.

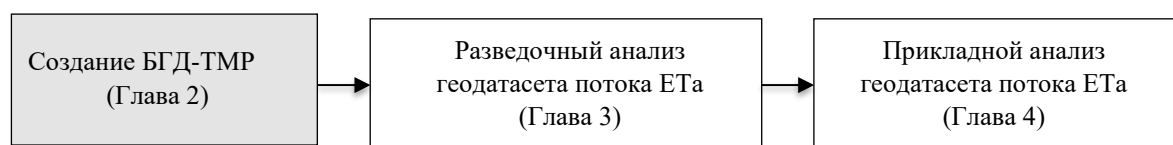


Рисунок 2.1 – Этапы исследований слоев БГД-МР

В разделе 2.1 представлена краткая природно-географическая характеристика территории Саратовской области. Основное внимание уделено картографическому анализу территории Марковского района. В этой связи рассмотрены характеристики рельефа, климата, почвенного и растительного покровов, гидрогеологического строения, а также развитие аграрного сектора, в частности оросительного комплекса. Эти данные послужили основой для целенаправленного количественного описания природных условий и факторов, влияющих на использование земельных и водных ресурсов на территории Марковского района при ведении пропашного земледелия. С этой целью на основании вывода Главы 1 о достоверности результатов оценки *ETa* по данным ДЗЗ, этот параметр, как физически обоснованный и объективно измеряемый, а также тесно связанный с пространственно-временным варьированием использования водных и земельных ресурсов, был выбран для дальнейших исследований.

В разделе 2.1 приведена природно-географическая характеристика Саратовской области, включающая описание рельефа земной поверхности, ландшафтное районирование и гидротермический коэффициент Селянинова. Для природно-географического описания Марковского района были использованы характеристики почвенного покрова, гидрогеологического районирования и климата. Приведено описание развития аграрного сектора, а также истории и текущего состояния оросительного комплекса, включающего Приволжскую оросительную систему им. И. П. Кузнецова и Комсомольскую оросительную систему (соответственно, КОС и ПОС), построенные в 1970-е годы.

В разделах 2.2 и 2.3 обоснована необходимость создания базы геоданных (БГД) характеристик географического экстенда сельской местности МР. Создание этой базы стало необходимым для структурирования, обработки и анализа большого количества связанных между собой слоев характеристик территории проведения исследований двух типов - базовых и основных. В рамках создания БГД-МР представлено обоснование выбора необходимого программного обеспечения (ПО). На основании проведенного анализа было выбрано ПО ArcGIS Pro 2.8, обладавшее на момент проведения диссертационного исследования наиболее эффективным набором инструментов для решения поставленных задач. Приведено описание базовых и основных слоев БГД-МР, а также приведены методики наполнения первых из них, включающих: 1) административные границы; 2) муниципальные поселения; 3) поверхностные водные объекты; 4) осевые линии магистральных каналов ПОС и КОС; 5) границы контуров дождевальных машин (ДМ) кругового действия (КД) по состоянию на 1976 г.; 6) основные виды землепользования (ЗП); 7) границы территорий разной удаленности от уреза левого берега реки Волги; 8) местоположения метеостанции г. Маркс и г. Ершов; 9) местоположения экспериментального полигона полевого мониторинга 2006 – 2009 гг. Для каждого из этих слоев приведена методика их наполнения фактическими геоданными.

В разделе 2.4 представлена методика и результаты анализа архивных рядов данных температур воздуха и норм осадков 2003–2017 г. станции г. Ершов, а также

рассчитанных по ним для летних месяцев временных рядов значений испаряемости с водной поверхности по модели Иванова и гидротермического коэффициента Селянинова.

В разделе 2.5 представлены результаты оценок потока $ET_{ам}$, полученных в результате обработки данных наземного мониторинга влагозапасов на экспериментальном полигоне с посевами орошаемой люцерны и их сопоставления с оценками потока $ET_{aδ}$, полученных по данным ДЗЗ, для рядом расположенных орошаемых производственных посевов этой же культуры.

2.1. Природно-географическая характеристика Саратовской области и Марксовского района, расположенного на ее территории

Территория Саратовской области, площадь которой составляет 100,2 тыс. км², расположена на юго-востоке Европейской части России (рисунок 2.2 а). Эта территория разделена на 4 городских округа и 37 муниципальных районов (19 на Правобережье, 18 - на Левобережье), а также 37 городских и 259 сельских поселений. Протяженность Саратовской области с запада на восток составляет 575 км, а с севера на юг – 240 км. Отметки ее земной поверхности лежат в диапазоне от 19 м до 384 м.

В пределах водосбора реки Волги орографические районы Саратовской области имеют равнинный характер со ступенчатой сменой с запада на восток на правобережье р. Волги и на левобережье — с севера на юг (рисунок 2.2 б). При этом связь характеристик рельефа с климатом прослеживается на картограмме ландшафтного районирования (рисунок 2.2 в), а также картограмме гидротермического коэффициента (ГТК) Селянинова [65], отображенной на рисунке 2.2 г. [16].

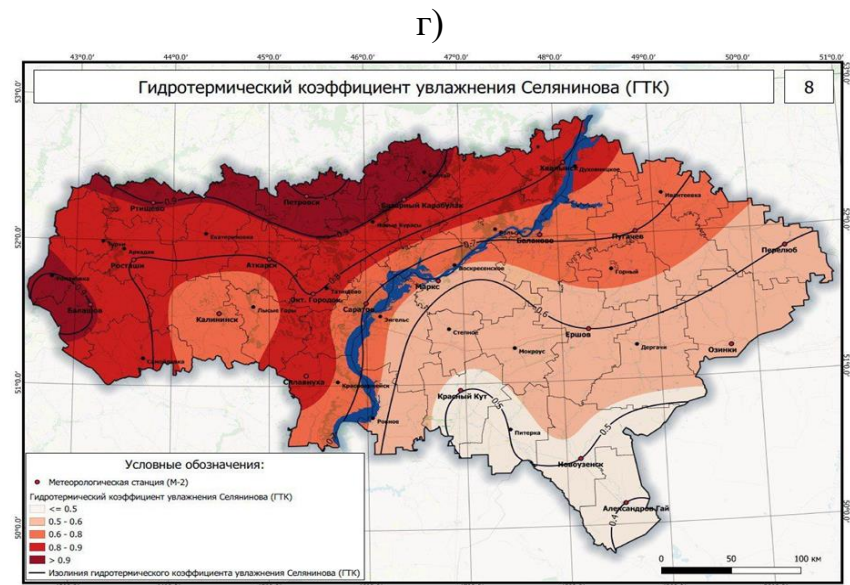
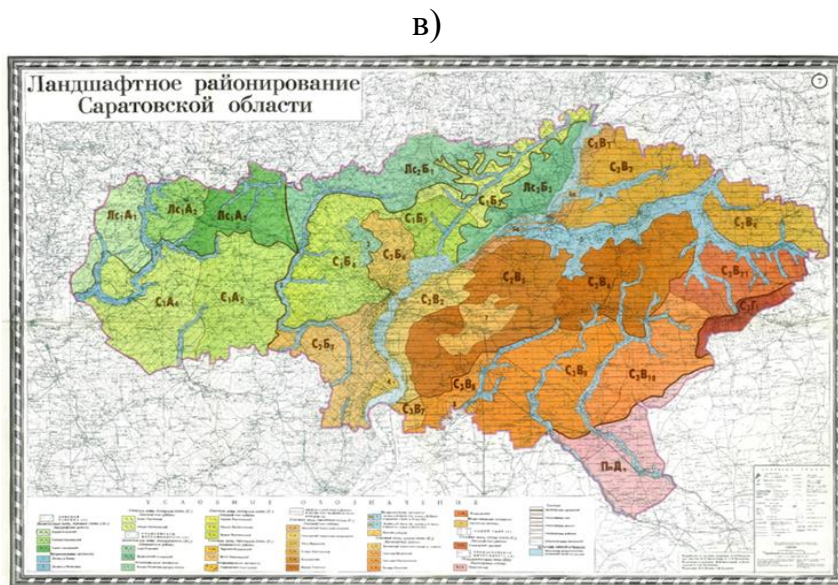
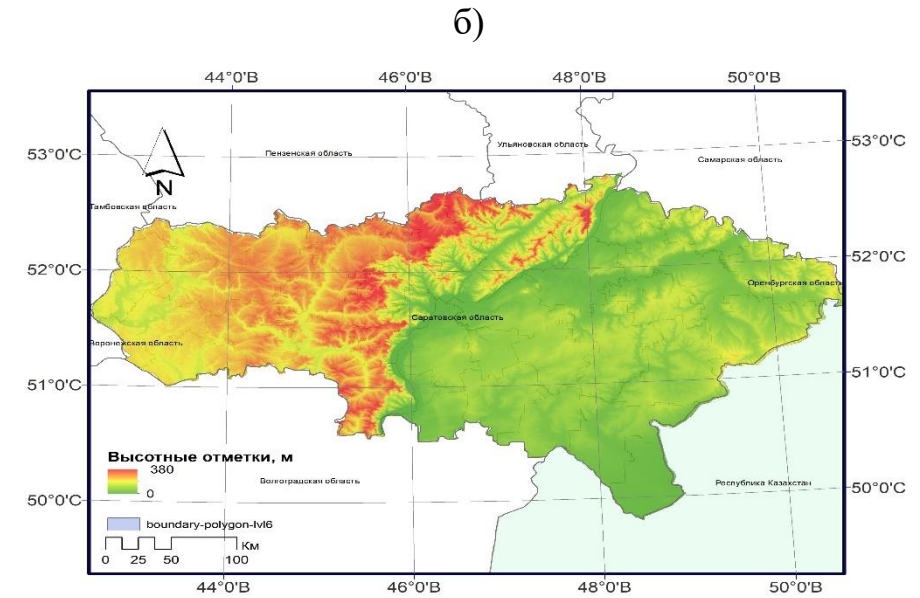
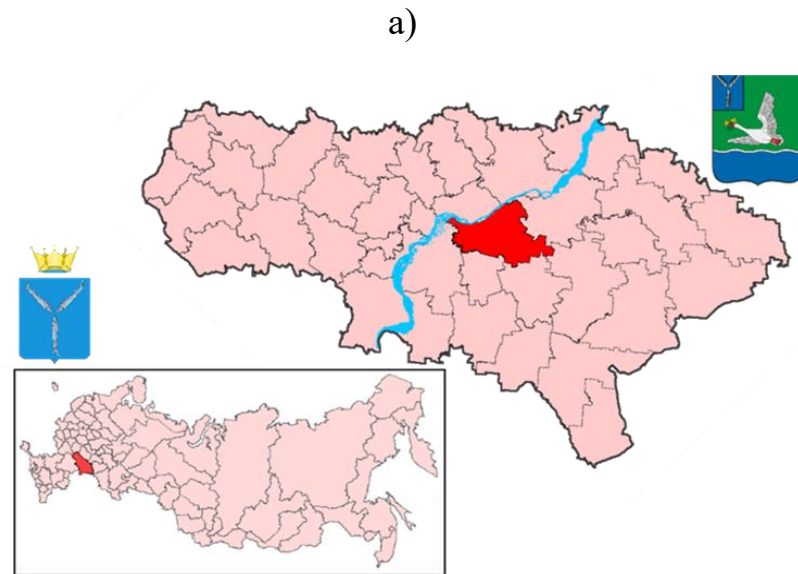


Рисунок 2.2 – Картограммы Саратовской области: а) административных границ; б) рельефа земной поверхности; в) ландшафтного районирования; г) гидротермического коэффициента Селянинова теплого периода

2.1.1. Природно-географическая характеристика Марковского района Саратовской области

Территория Марковского района Саратовской области расположена на Левобережье (Заволжье), относится к западной провинции среднеазиатской зоны пустынь умеренного климатического пояса, включающей зону сухих степь с темно-каштановыми и каштановыми почвами, а также зону полупустынь со светло-каштановыми и бурыми почвами. Для нее характерны мягкие формы рельефа с незначительным овражным расчленением (рисунок 2.3 а). Вблизи границы с Казахстаном эти формы переходят в отроги возвышенности Общий Сырт, для которой характерны плоско-выпуклые водораздельные поверхности с крутыми склонами с максимальными отметками высот порядка 200–220 м.

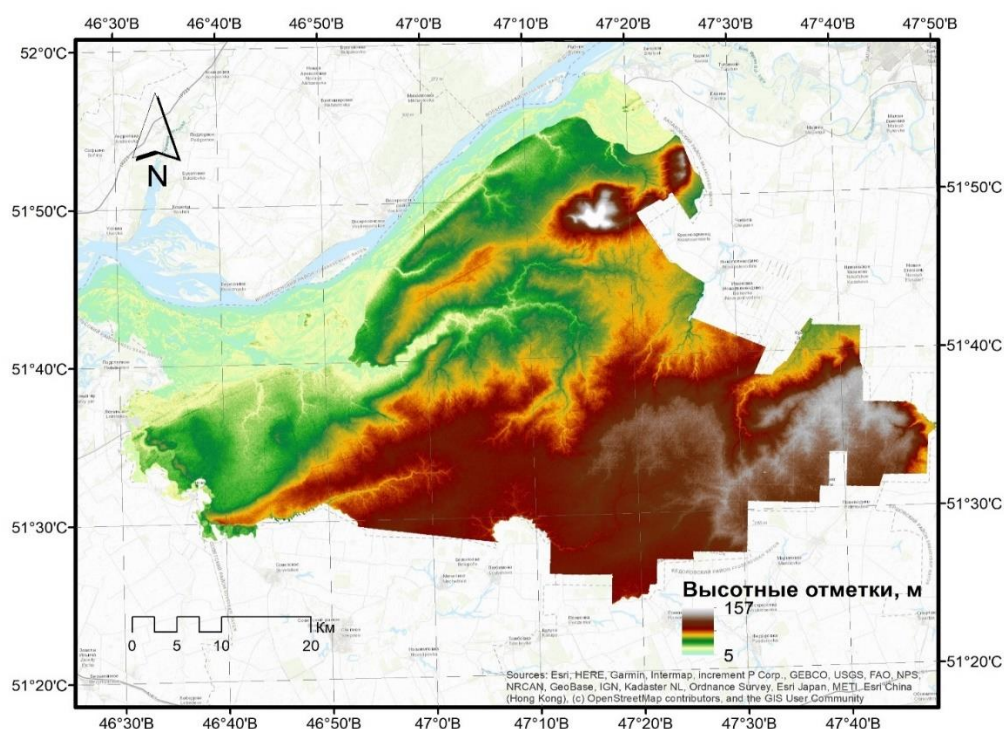


Рисунок 2.3 – Картограмма отметок высот территории Марковского района, построенная с использованием данных SRTM

2.1.2. Почвенные и гидрогеологические характеристики Марковского района

Основные типы почв на территории Марковского района (рисунок 2.4) представлены: а) темно-каштановыми почвами (13), контуры которых приходятся на северную часть; б) темно-каштановыми солонцеватыми (21а-в), контуры которых приходятся на среднюю часть; в) темно-каштановыми почвами (9) контуры которых приходятся на южную часть.

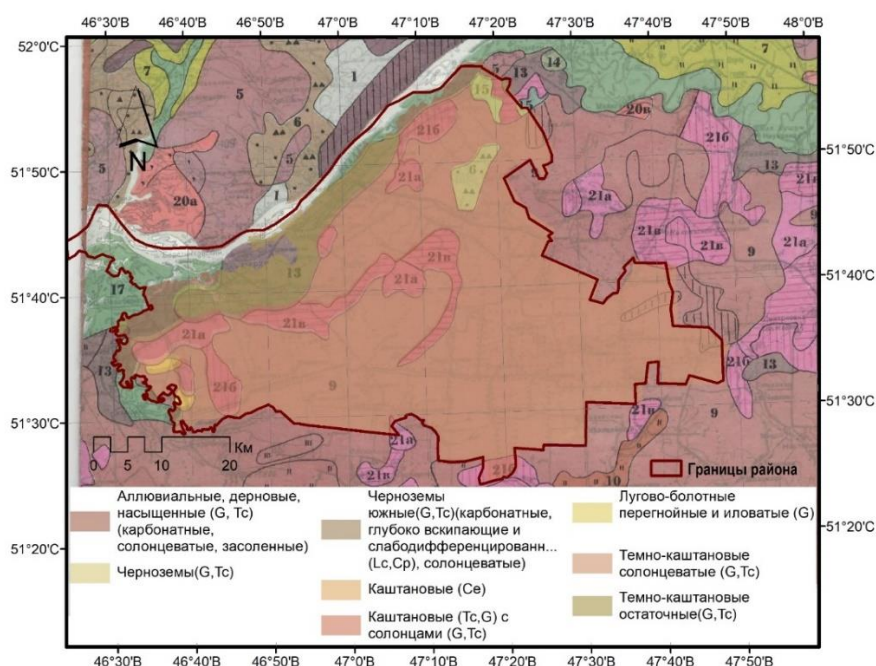


Рисунок 2.4 – Картограмма почвенного покрова территории Марковского района

В гидрогеологическом отношении территория Марковского района находится в пределах Прикаспийского артезианского бассейна. Водоносный горизонт верхне- и средне-четвертичных отложений, мощность которых составляет порядка 25–30 м с минерализацией в пределах 1–15 г/л, имеет весьма пестрый механический состав водовмещающих пород с коэффициентами фильтрации в пределах от 0,9 м/сутки (в глинах) до 10–12 м/сутки (в песках). Варьирование глубины залегания грунтовых вод (ГВ) в долинах левобережных притоков реки Волги составляет 12 м, а под поверхностью приволжских террас - в пределах 20–50 м.

2.1.3 Климатические характеристики Марковского района

Климатические характеристики территории Марковского района, используемые для районирования сельскохозяйственного производства, имеют выраженную пространственную дифференциацию. Так, годовой слой осадков в его северной части оценивается в пределах 450–500 мм, а в наиболее засушливой части на его юго-востоке – в пределах 350–390 мм. Аналогичная дифференциация прослеживается и для суммы активных температур вегетационного периода, которые в северной части составляют 2600–2700°C°, а на юго-востоке – 2800–2900 С° [163], потенциального испарения, годовой слой которого варьирует в пределах 780–920 мм, а также дифференциацией фактического слоя годового суммарного испарения, годовой слой которого варьирует в пределах 300–470 мм [163]. Эти особенности многолетнего формирования гидротермического режима на территории Марковского района были обобщены в [16] в виде картограммы ГТК Селянинова для теплого периода с мая по сентябрь 2002–2022 гг. (рисунок 2.5).

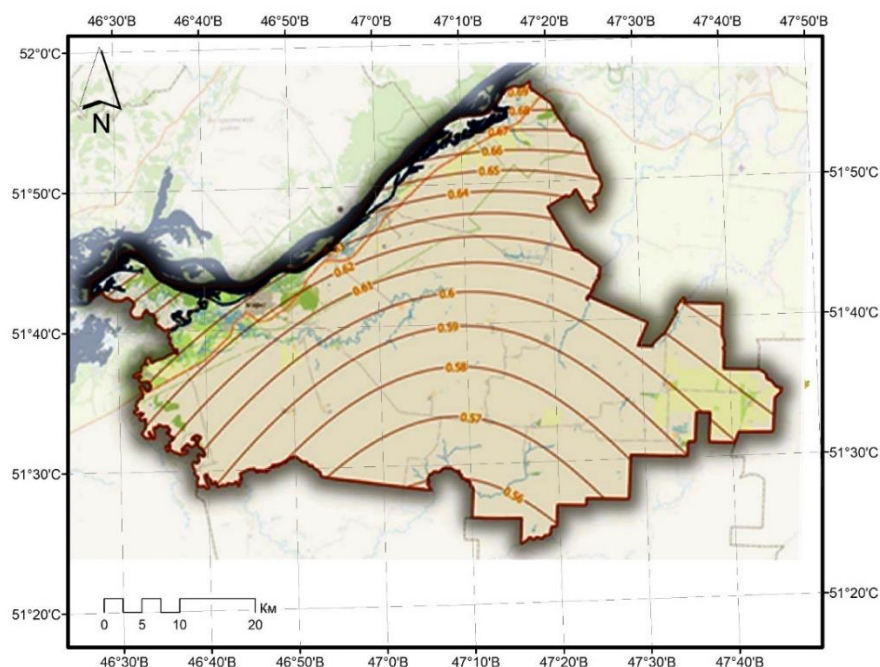


Рисунок 2.5 – Картограмма ГТК Селянинова с шагом 0,01 территории Марковского района

Рисунок 2.6 – Картограмма развития орошаемого земледелия Саратовской области

По данным на 2024 год орошение сельскохозяйственных посевов в районе осуществляется на площади 30,3 тыс. га, при этом 29,5 тыс. га орошается дождеванием, и 785 га с использованием капельного орошения [8]. В отдельных случаях для полива овощных культур по бороздам используются участки с необходимыми уклонами, расположенными в непосредственной близости от водоподающей инфраструктуры. Однако, в большинстве случаев, это приводит к водной эрозии почв, а также выносу применяемых химических веществ в нижерасположенные поверхностные водные объекты.

Пригодность почв территории МР для широкомасштабного производственного орошения была обоснована в процессе полевых изысканий при проектировании оросительных систем. Этому соответствовали в целом следующие благоприятные характеристики: а) незначительная, менее 1 г/л минерализация грунтовых вод, уровень которых варьировал в зависимости от удаленности от реки Волги на глубинах, начиная от 5–7 м, а местами и значительно ниже, доходя до глубин порядка 40 м; б) двуслойное строение зоны полного насыщения со слабопроницаемым верхним слоем, представленным в основном суглинками и нижерасположенным водоносным горизонтом, сложенным песками или супесями; в) высокая естественная дренированность.

Данные, полученные в результате почвенных и гидрологических обследований, послужили обоснованием пригодности территории МР для строительства КОС и ПОС (рисунок 2.7). Построенные в 1970-е годы, эти оросительные системы по своим техническим характеристикам соответствовали техническому уровню и знаниям того времени в области орошаемого земледелия, мелиоративного почвоведения, а также физики и гидрологии почв [1]. Однако уже в первые годы эксплуатации обеих ОС, в зоне их действия, а также и на прилегающих к ним территориях были выявлены высокие скорости подъема уровня ГВ [57]. Наиболее отчетливо это проявилось на нижних надпойменных террасах в виде повышения минерализации ГВ и аккумуляции солей в КС-ПП, что привело к возникновению очагов вторичного засоления и осолонцевания,

повлекших за собой деградацию ПП, с последующим выводом соответствующих земельных участков из эксплуатации [56].



Рисунок 2.7 – Картограмма мелиоративного состояния орошаемых земель Саратовской области

2.2. Методика формирования базы геоданных характеристик территории Марковского района

Основу методики исследований пространственно-временных (ПВ) характеристик потоков ETa с контуров орошаемых и неорошаемых агроценозов на географическом экстенде сельской местности МР составили методы разведочного анализа геодатасета (РАГеоД) потоков ETa . Для эффективной реализации вычислений, получения достоверных результатов и их анализа была разработана структура базы геоданных (БГД), которая включала слои базовых и основных геообъектов, представленных в единой проекции UTM38, что являлось

необходимым для проведения совместного пространственно-временного анализа при решении поставленных задач.

2.2.1 Выбор программного обеспечения для создания БГД МР

Для создания эффективной БГД, необходимой для решения поставленных в данном диссертационном исследовании задач, был проведен анализ современного программного обеспечения ГИС. При этом основное внимание было уделено функционалу систем управления базой геоданных (СУБГД), а также наборам инструментов, необходимых как для создания и наполнения слоев геоданных, так и для проведения последующего пространственно-временного анализа. В результате было выбрано программное приложение (ПО) ArcGIS Pro 2.8, как наиболее полно отвечающее этим требованиям.

2.3. Слои базовых пространственных объектов базы геоданных Марковского района

На начальном этапе создания БГД Марковского района (БГД-МР) был сформирован набор слоев базовых геообъектов (БГ), спецификация которых представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Набор слоев базовых геообъектов БГД-МР

Слой	Геообъект	Количество	Тип слоя геоданных	Модель данных, формат
БГ.1	Административные границы	1	полигональный	векторные данные, шейп-файл
БГ.2	Муниципальные поселения	1	точечный	векторные данные, шейп-файл
БГ.3	Поверхностные водные объекты	1	полигональный	векторные данные, шейп-файл
БГ.4	Осевые линии магистральных каналов ПОС и КОС	1	полигональный	векторные данные, шейп-файл
БГ.5	Границы контуров ДМ-КД по состоянию на 1976 г.	1	полигональный	векторные данные, шейп-файл

Продолжение таблицы 2.1

Слой	Геообъект	Количество	Тип слоя геоданных	Модель данных, формат
БГ.6	Основных видов землепользования	1	растровый	растровые данные, geotiff
БГ.7	Границы зон разной удаленности от уреза левого берега р. Волги	1	полигональный	векторные данные, шейп-файл
БГ.8	Местоположение метеостанции г. Маркс и г. Ершов	1	точечный	векторные данные, шейп-файл
БГ.9	Местоположение экспериментального полигона полевого мониторинга	1	точечный	векторные данные, шейп-файл

Структурная организация набора базовых слоев БГД-МР отображена на рисунке 2.8.

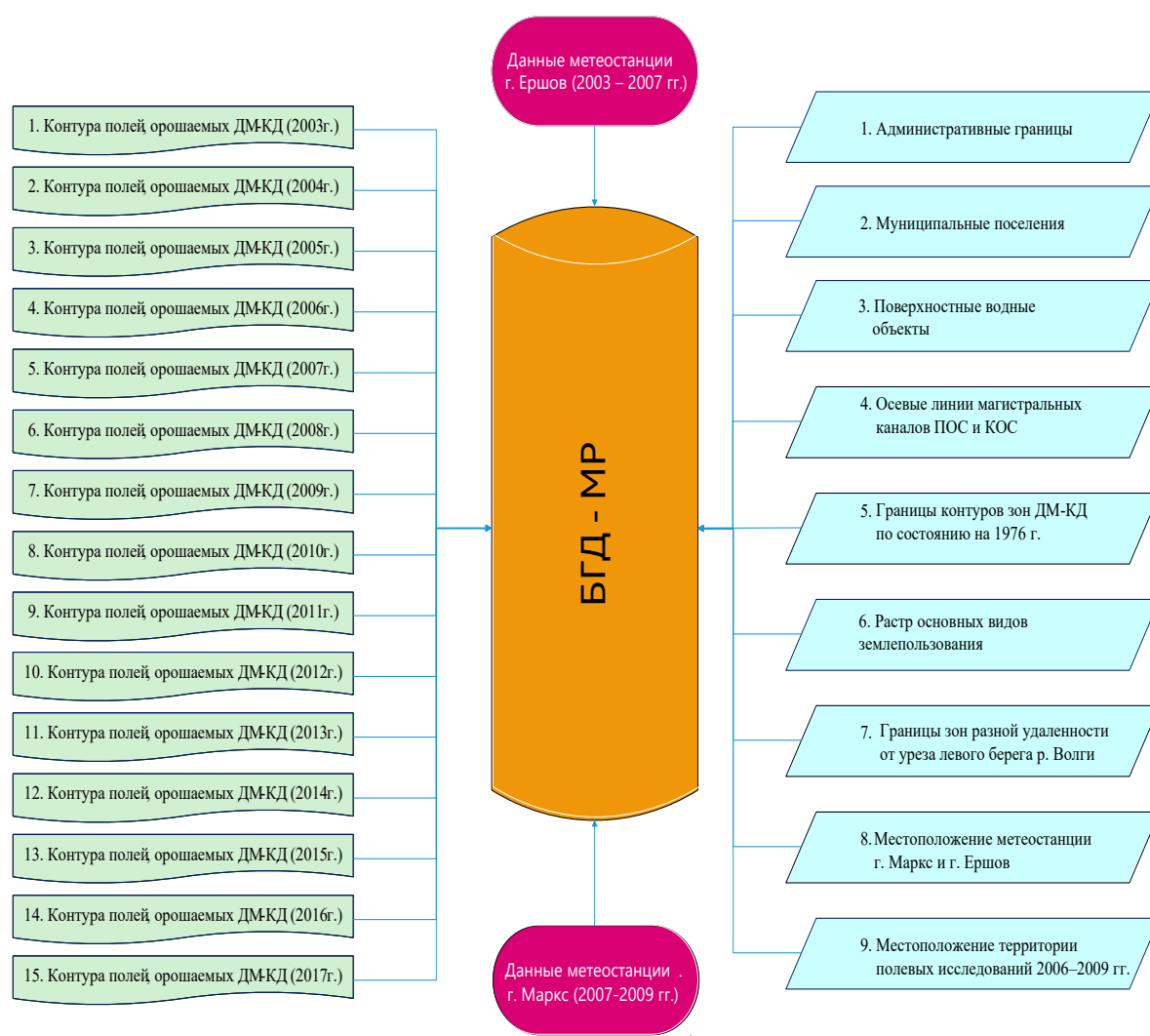


Рисунок 2.8 – Схема структурной организации набора слоев БГД-МР

2.3.1 Слой административных границ, населенных пунктов и поверхностных водных объектов

Для создания слоев административных границ территории (БГ.1), населенных пунктов (БГ.2) и водных объектов (БГ.3), расположенных на территории МР (рисунок 2.9) были использованы геоданные, размещенные на ресурсе OpenStreetMap - <http://osm-russa.narod.ru/>.

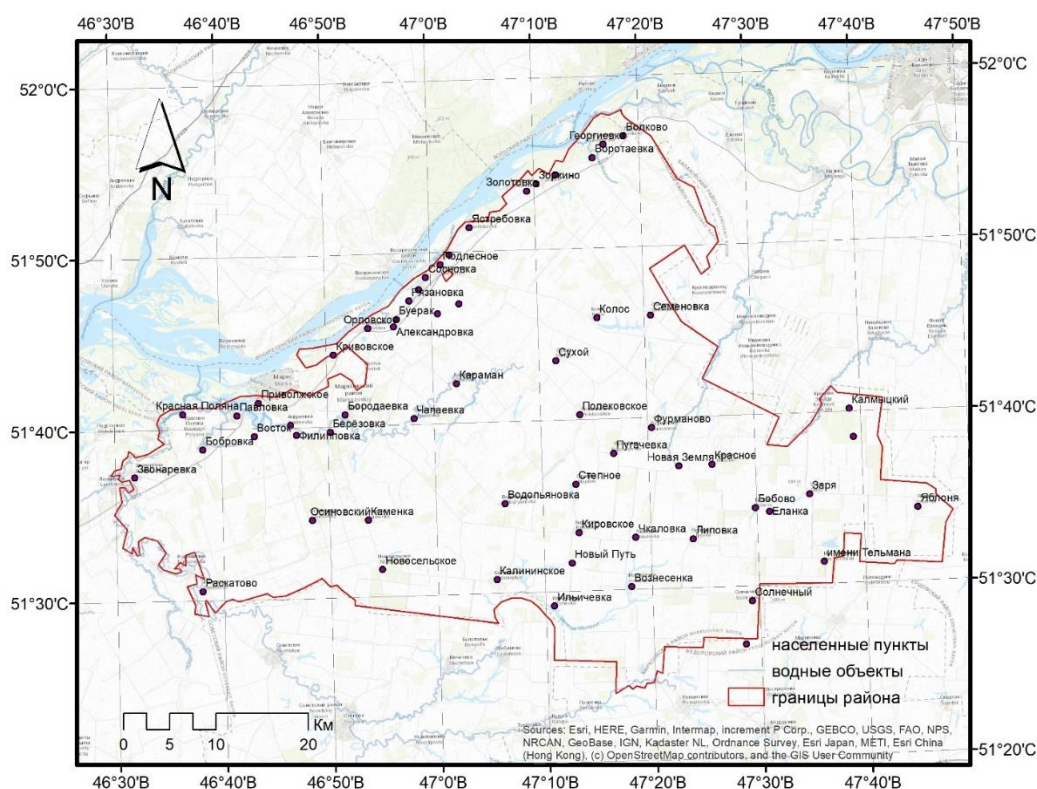


Рисунок 2.9 – Картографическое отображение слоев административных границ (БГ.1), населенных пунктов (БГ.2) и водных объектов (БГ.3)

2.3.2. Слой водотransпортирующей инфраструктуры оросительных систем

Для создания слоя осевых линий магистральных каналов ПОС и КОС (БГ.4), расположенных на географическом экстенде МР, были использованы данные съемки в видимом диапазоне с КА Landsat 4,5,7,8. По спутниковым изображениям

было проведено ручное оцифровывание объектов. В результате были получены соответствующие векторные данные в формате шейп-файла (рисунок 2.10).

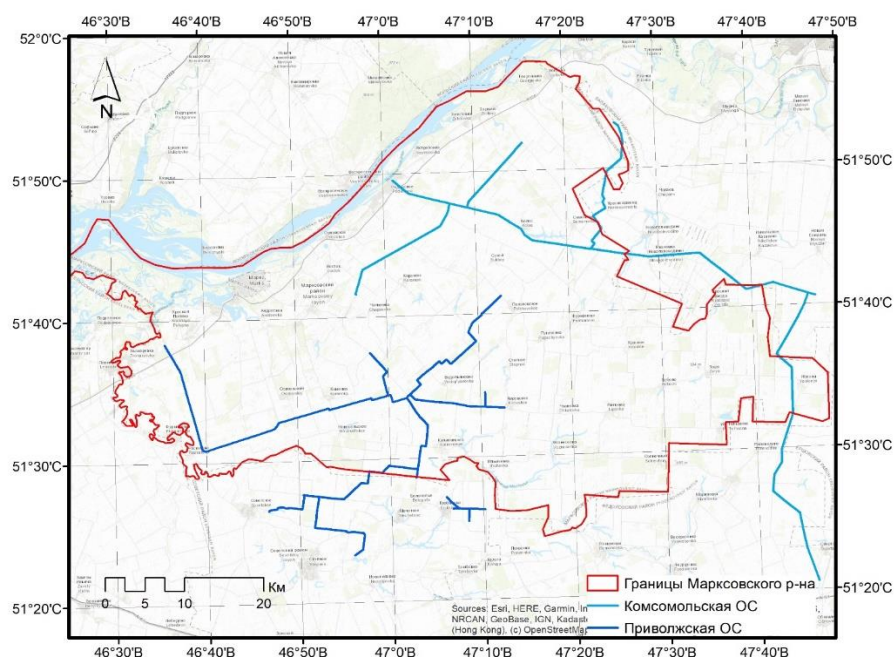


Рисунок 2.10 – Картограмма слоев осевых линий магистральных каналов ПОС и КОС (БГ.4)

Для создания слоя местоположений границ земельных участков, обслуживаемых ДМ-КД по состоянию на 1976 г. (БГ.5), были использованы чертежи соответствующих проектов строительства КОС и ПОС (рисунок 2.11).

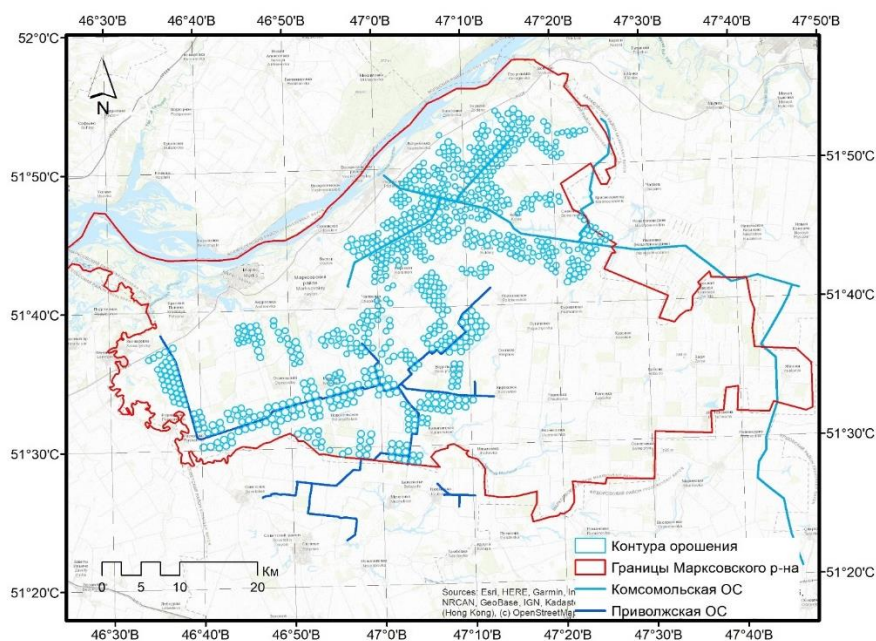


Рисунок 2.11 – Картограмма слоев контуров земельных участков, обслуживаемых ДМ-КД по состоянию на 1976 г. (БГ.5)

2.3.3. Слой основных видов землепользования

Для формирования слоя десяти основных идентифицированных видов землепользования (ЗП) на географическом экстенде Марковского района был использован растровый слой с пространственным разрешением 150 м, созданный в международном институте прикладных системных исследований ИАСА (International Institute for Applied Systems Analysis) для территории РФ [117]. Из этого слоя, включавшего 20 видов землепользования, с помощью соответствующих инструментов программного обеспечения ArcGIS Pro 2.8 и слоя административных границ (БГ.1) был получен растровый слой БГ.6, включавший десять видов ЗП, идентифицированных на географическом экстенде Марковского района Саратовской области (рисунок 2.12).

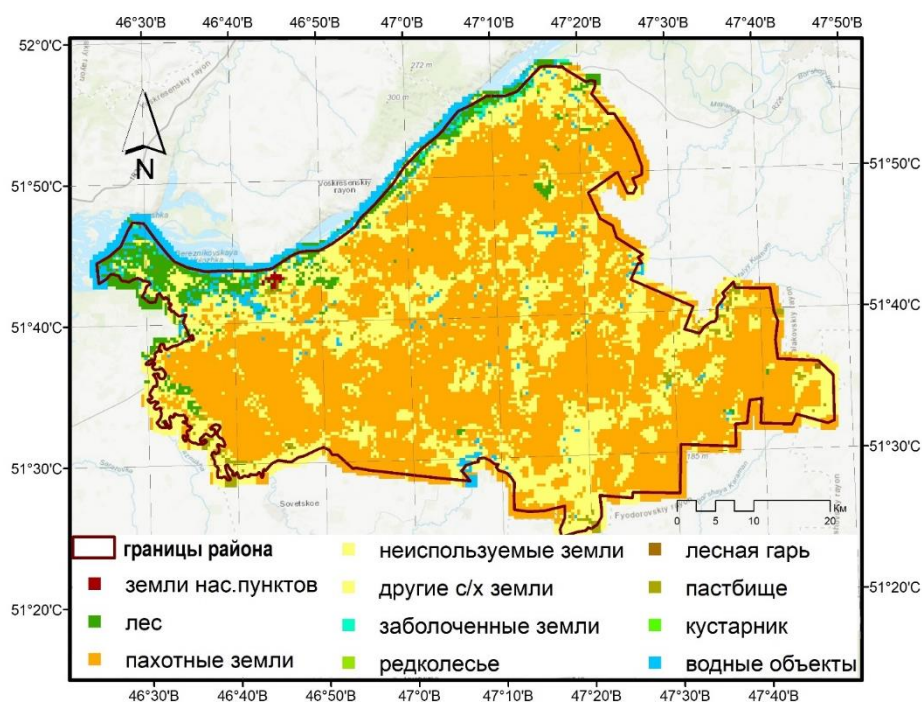


Рисунок 2.12 –Картографическое отображение слоя БГ.6 десяти видов ЗП, идентифицированных на географическом экстенде Марковского района Саратовской области (по данным ИАСА по состоянию на 2005 г.

Показатели площадей 10 видов ЗП слоя БГ.6 приведены в таблице 2.2, а также отображены на рисунке 2.13.

Таблица 2.2 – Характеристики слоя БГ.6 основных видов землепользования на территории Марковского района (по данным ИА СА на 2005 г.)

Характеристики площадей	Лес	Пахотные земли	Неиспользуемые земли	Другие сельскохозяйственные земли	Заболоченные земли	Редколесье	Лесная гарь	Пастбище	Кустарники	Водные объекты	ВСЕГО
код	101	102	103	108	110	112	113	114	116	120	-
км ²	122,79	1775,5	78,94	774,58	10,98	0,15	2,65	27,17	3,21	109,30	2908
%	3,23	64,27	2,72	26,66	0,38	0,01	0,09	0,94	0,11	3,76	100

Отметим, что величина доли пахотных земель (64,27%) по состоянию на 2005 г. (таблица 2.2) достаточно близка к значению (~ 67%), приведенному на сайте администрации Марковского района по состоянию на 2024 г. [8]. Имеющееся незначительное отличие может быть объяснено разными датами, которым соответствуют оба значения, а также отличием методик, с помощью которых они были получены. В частности, часть земель, отнесенных к видам «неиспользуемые земли» и «другие сельскохозяйственные земли», могла с 2005 г. перейти в категорию «пахотные земли».

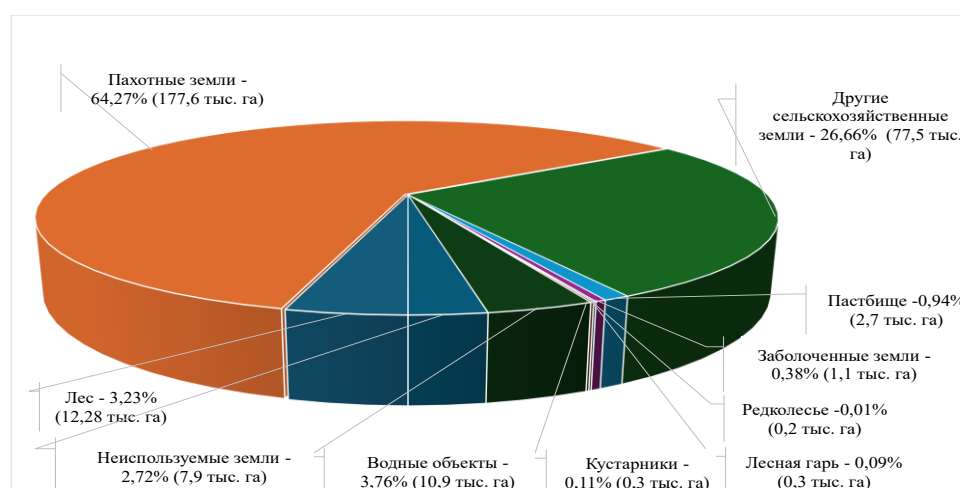


Рисунок 2.13 - Распределение площадей слоя БГ.6 по 10 основным видам землепользования (по данным ИА СА на 2005 г.)

На основании сопоставления площади пахотных земель, рассчитанных по растровому слою видов землепользования IIASA и официальным данным, был сделан вывод, что суммарная площадь пахотных земель, в целом отражала ситуацию в исследованный период 2003–2017 гг. Это послужило основанием для использования растровых слоев десяти идентифицированных видов ЗП в дальнейших исследованиях.

2.3.4. Слой границ территорий зон разной удаленности от уреза левого берега реки Волги

Для пространственно-временного анализа потоков *ETa* на территории Марковского района было проведено ее деление на 7 зон, разно удаленных от границы левого берега реки Волги. С этой целью в векторном формате был создан слой масок семи границ (БГ.7), воспроизводящих контур границы левого берега р. Волги и расположенных на следующих удалениях от него: 1) 5 км; 2) 10 км; 3) 20 км; 4) 30 км; 5) 40 км; 6) 50 км; 7) 60 км. В результате были получены контуры территорий 7 зон, ограниченных внешними границами территории Марковского района (ТМР), а также внутренними границами контуров, расположенных в следующих пределах от границы левого берега р. Волги: 1) 0–5 км; 2) 5–10 км; 3) 10–20 км; 4) 20–30 км; 5) 30–40 км; 6) 40–50 км; 7) 50–60 км (рисунок 2.14).

Распределение площадей 10 видов ЗП по семи зонам разной удаленности от уреза левого берега р. Волги, рассчитанных в ПО ArcGIS Pro 2.8, представлены в таблице 2.3.

Анализ этих данных свидетельствует о значимых отличиях распределения площадей основных видов землепользования 1-й зоны от других, а также схожесть этих распределений зон 2–6. Это находит свое объяснение с одной стороны расположением в 1-й зоне большого числа населенных пунктов, рекреационных объектов, поверхностных водных объектов и лесных полос, находящихся вдоль

левого берега реки Волги, а с другой стороны аграрным характером территорий остальных зон.

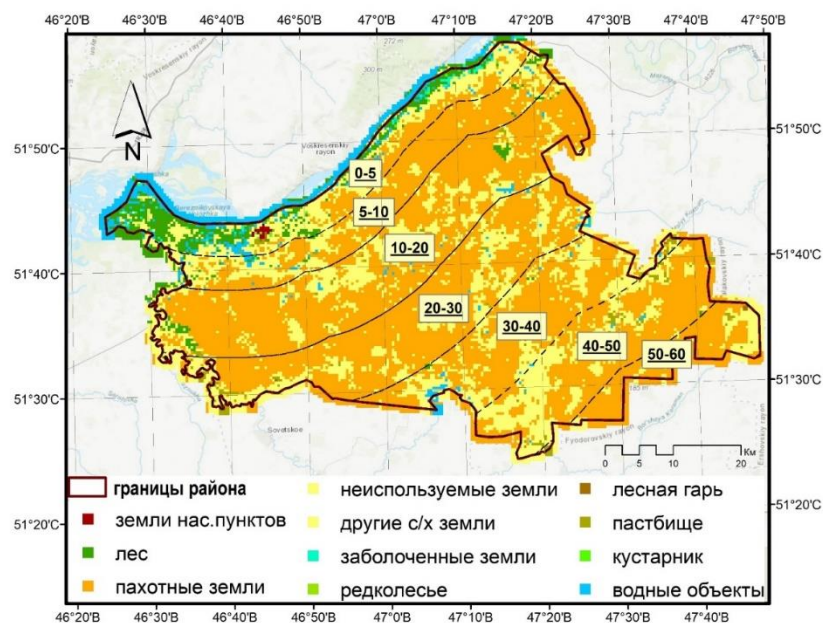


Рисунок 2.14 – Отображение картограммы слоя БГ.7 границ зон разной удаленности от берега р. Волги на подложке раstra десяти видов ЗП

Таблица 2.3 – Площади 10 видов ЗП, распределенных по 7 зонам разной удаленности от уреза левого берега реки Волги

Номер зоны	Расстояния от уреза левого берега р. Волги, км	Площадь, км ²										
		Лес	Пахотные земли	Неиспользуемые земли	Другие сельско- хозяйственные земли	Заболоченные земли	Редколесье	Лесная гарь	Природные пастбища	Кустарники	Водные объекты	10 видов ЗП
1	0-5	93,03	49,31	24,65	94,43	10,72	0,15	1,26	2,37	2,66	88,15	366,72
2	5-10	14,05	203,01	8,07	98,30	0,27	0,0	0,13	0,43	0,27	7,51	332,03
3	10-20	13,80	516,50	13,37	162,90	0,0	0,0	0,0	3,07	0,29	4,86	714,79
4	20-30	0,11	414,13	13,52	135,20	0,0	0,0	0,29	6,82	0,0	2,81	572,88
5	30-40	0,97	248,25	4,72	114,16	0,0	0,0	0,15	2,36	0,0	3,90	374,51
6	40-50	0,00	230,07	11,00	142,60	0,0	0,0	0,28	10,17	0,0	1,66	395,78
7	50-60	0,83	114,23	3,61	26,99	0,0	0,0	0,55	1,95	0,0	0,42	148,57

2.3.5. Слой инфраструктуры гидрометеорологического мониторинга

В исследуемый период 2003–2017 гг. на территории Марковского района функционировала одна гидрометеорологическая станция системы Росгидромет, расположенная в окрестностях г. Маркс, на незначительном удалении от берега р. Волги. Ее месторасположение попадает в зону между зеркалом р. Волги и территориями, соприкасающимися с полупустынями левого берега. По результатам собственных наблюдений и свидетельствам местных жителей, в летний период в отмеченной зоне формируется своеобразный микроклимат, создаваемый водными массами, испаряющимися с поверхности зеркала реки Волги, ширина которой в этих местах составляет 10–12 км и более. В ряде случаев этот микроклимат оказывает сопротивление проникновению жарких сухих воздушных масс с левобережья реки Волги, приходящих из пустынных и полупустынных районов соседнего Казахстана. В других случаях это способствует прохождению дождевых фронтов вдоль русла р. Волги, что приводит к своеобразной регионализации выпадения дождевых осадков в летний период, проявляющейся в преимущественном выпадении осадков в прибрежной полосе левобережья шириной 5–10 км.

Ближайшая к границам МР гидрометеорологическая станция расположена на территории г. Ершов, на расстоянии порядка 110 км в восточном направлении от г. Маркс и на расстоянии порядка 50 км от восточной границы этого района.

Для географической привязки архивных данных метеорологического мониторинга в БГД-МР был создан слой БГ.8 (рисунок 2.15) с местоположениями обеих метеостанций.

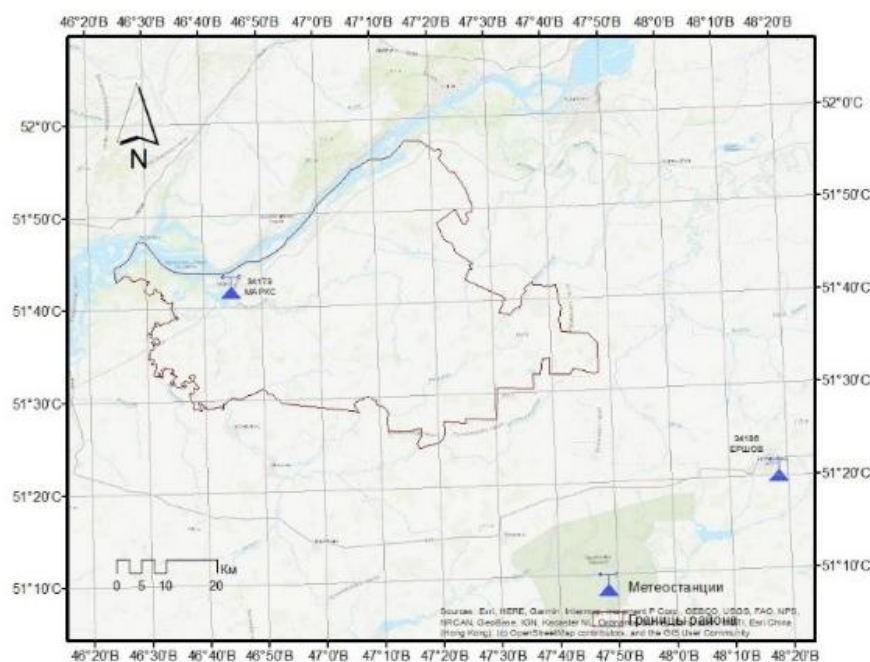


Рисунок 2.15 – Картографическое отображение слоя БГ.8 местоположений метеостанций г. Маркс и г. Ершов

Дополнительными структурными элементами слоя БГ.8 созданной БГД-МР являлись наборы данных метеорологического мониторинга погодных условий, полученных на метеостанциях г. Маркс и г. Энгельс Росгидромета. Соответствующие таблицы данных были привязаны к координатам их местоположений, а результаты их анализа приведены в разделе 2.5.

2.3.6. Слой местоположения экспериментального полигона полевого мониторинга

Для отображения местоположения объекта проведения полевого мониторинга влагозапасов КС-ПП (2006–2009 гг.) в БГД-МР был создан слой БГ.9, содержащий координаты этого объекта (рисунок 2.16).

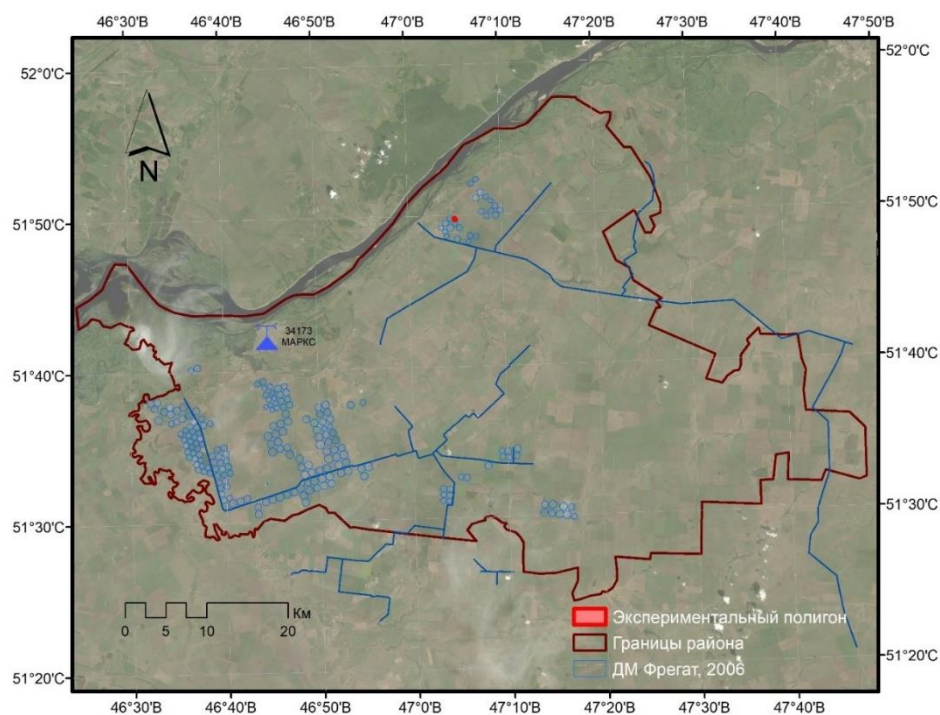


Рисунок 2.16 – Картографическое отображение слоя БГ.9 с местоположением объекта полевого мониторинга влагозапасов КС-ПП

Дополнительными структурными элементами слоя БГ.9 созданной БГД-МР являлись наборы данных многолетнего мониторинга влагозапасов, проведенного на 6 экспериментальных площадках. Соответствующие таблицы данных были привязаны к координатам их местоположений, а результаты их анализа приведены в разделе 2.6.

2.3. Слои основных геообъектов базы геоданных Марковского района

В первой главе было показано, что использование геоданных ДЗЗ среднего и высокого разрешения позволяет находить более эффективные решения традиционных задач во многих областях исследований земной поверхности из космоса. Это в полной мере относится к задачам исследования динамики потока *Ета* на значительных по географическому экстенду территориях суши при управлении водными ресурсами на уровне бассейнов рек [8, 163], задач оперативного управления и контроля на уровне оросительных систем [96, 175, 16]

и отдельных хозяйств [83, 220], для решения которых используются архивы космоданных [28, 20]. Это обстоятельство послужило основой для принятия решения об использовании продукта MOD16A2, сформированного из восьмисуточных тайлов (*ETa8*).

В настоящем исследовании слои основных геобъектов включали: 1) геодатасеты *ETa8* (ОГ.1.1 - ОГ.1.15); 2) границы контуров земельных участков, орошаемых ДМ-КД (ОГ.2.1 - ОГ.2.15). Спецификация этих слоев представлена в таблице 2.4, структурная организация отображена на рисунке 2.5, а методика их формирования приведена в следующих разделах.

Таблица 2.4 – Набор слоев основных геобъектов БГД-МР

Слои	Объект	Количество	Тип геоданных	Модель данных, формат
ОГ.1	Суммарное восьмисуточное испарение	15	точечный	векторные данные, шейп-файл
ОГ.2	Границы контуров земельных участков, орошаемых ДМ-КД	15	полигональный	векторные данные, шейп-файл

2.3.1. Набор слоев потока *ETa8* отдельных лет исследованного периода 2003–2017 гг.

С целью формирования наборов геоданных, необходимых для проведения пространственно-временного (ПВ) анализа потоков *ETa* на географическом экстенде МР за вегетационные периоды 2003–2017 гг., были использованы тайлы геоданных *ETa8* продукта MOD16A2. Для единообразия был выбран единый временной интервал со 145 календарного дня (25 мая) по 241 календарный день (2 сентября) календарного года. Этот интервал соответствует среднегодовым датам начала и окончания поливного периода на ПОС и КОС Марковского района. Дополнительным основанием для сделанного выбора послужили результаты проведенного полевого мониторинга влагозапасов КС [37]. Согласно этим результатам, начало выбранного периода в целом соответствует моменту исчерпания этих влагозапасов на сельскохозяйственных землях, сформированных в результате весеннего снеготаяния и дождевых осадков.

На первом этапе подготовки исходных данных была сформирована и наполнена файловая база геоданных нижнего уровня обработки. Для этого на веб-сервисе Earth Explorer геологической службы США [119] были сформированы запросы на получение необходимых тайлов геоданных *ETa8*, покрывавших географический экстенд МР для интервала со 145 по 241 календарный день 15-летнего исследуемого диапазона с 2003 года по 2017 год. В результате было получено 195 временных тайлов (по 13 восьмидневных тайлов для каждого из 15 лет исследуемого периода) потоков *ETa8* с пространственным разрешением 500 м.

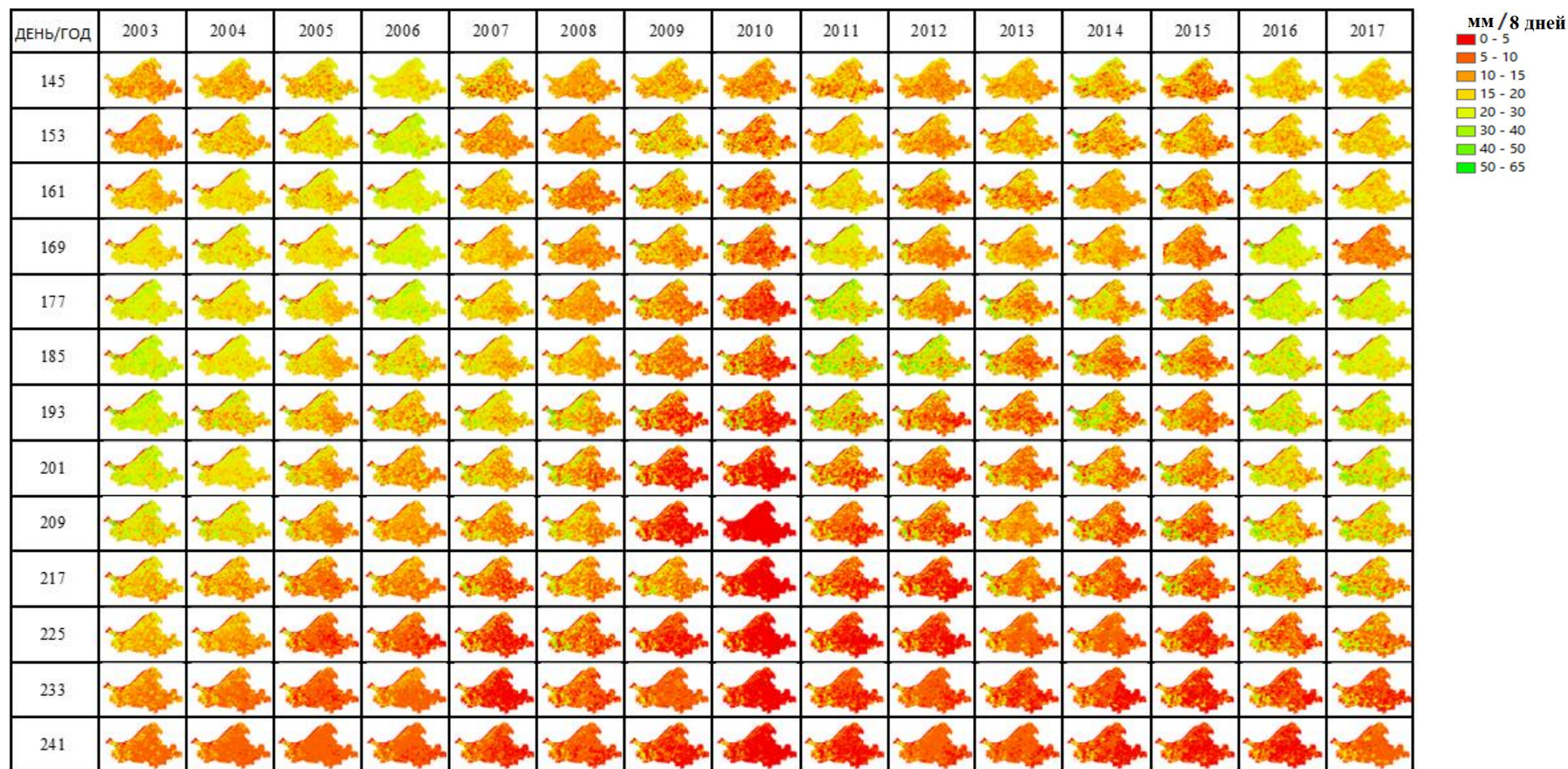
На втором этапе был проведен перевод растровых данных геоданных потоков *ETa8* в векторный точечный шейп-формат созданной БГД-МР. С этой целью на платформе ПО ArcGIS Pro 2.8 была создана специализированная модель, которая позволила автоматизировать трудоемкие рабочие процессы. Из загруженных тайлов продукта MOD16A2 по слою-маске административных границ МР (БГ.1) были вырезаны пиксели растрового слоя, находившиеся внутри этих границ. В результате было получено 13 слоев потоков для каждого из 15 лет (всего 195 слоев), каждый из которых содержал 20 887 пикселей, расположенных внутри границ МР. Затем, в соответствии с кодами метаданных этих слоев, были удалены пиксели, попадавшие на территории, занятые поверхностными водными объектами и муниципальными поселениями [239]. Таким образом, было получено 195 растровых слоев *ETa8*, структурированных в виде пространственно-временного куба, который включал для каждого из 15 лет исследуемого временного интервала с 2003 по 2017 год 13 слоев *ETa8* с 19 837 пикселями. Общее количество записей в БГД-МР составило 3 570 660 единиц. Соответствующие картограммы этих слоев, отображенные с помощью единой цветовой палитры, представлены на рисунке 2.17 в виде прямоугольной двумерной мозаики.

Представленная на рисунке 2.17 мозаика картограмм имеет 13 строк, соответствующих 8 суточным временным интервалам оросительного периода, и 15 столбцов, соответствующих годам исследуемого диапазона 2003–2017 гг. Сочетание в этой мозаике двух географических координат и координаты времени позволило наглядно отобразить пространственно-временную реакцию почвенного

и растительного покровов территории МР на внешние воздействия природного и антропогенного характера. Оценка показателей этой реакции нашла свое отражение в целях и задачах настоящего диссертационного исследования. Отметим при этом, что разработанная методика формирования базы данных МР, представленная в этой главе, была использована при решении иных задач, одна из которых состояла в оценке эффективности орошения посевов люцерны в ряде хозяйств Марковского и Энгельсского районов Саратовской области [23].

а)

б)

Рисунок 2.17– Мозаичное картографическое отображение набора слоев геоданных *ETa8* БГД-МР: а) картограммы *ETa8*;

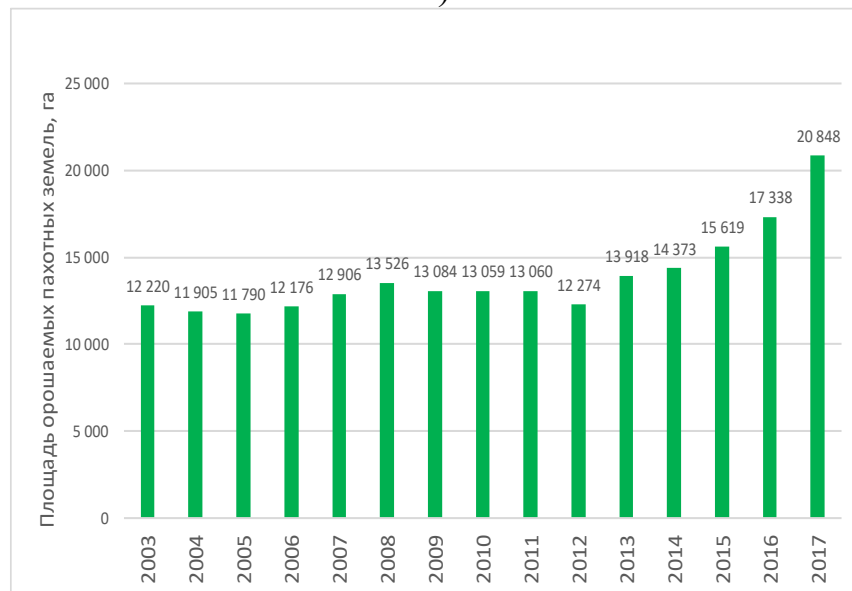
б) легенда

2.3.2 Набор слоев контуров, орошаемых дождевальными машинами кругового действия

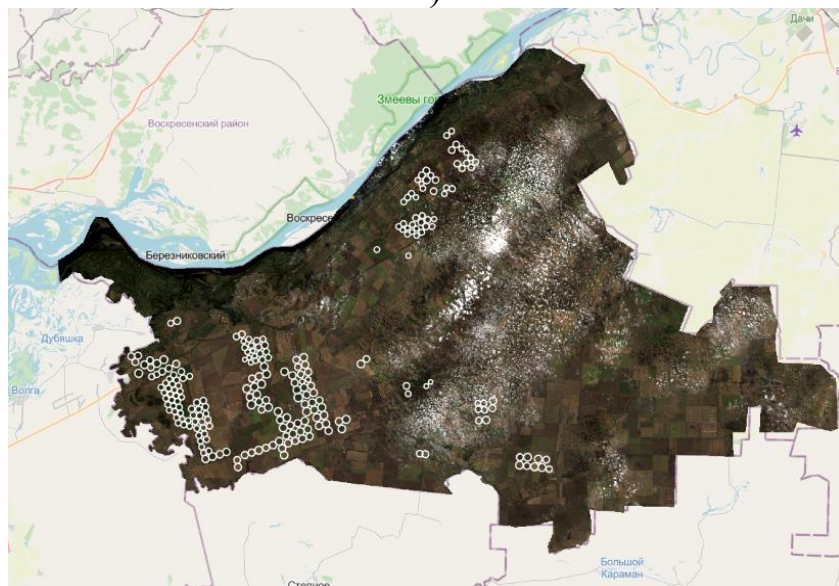
С целью проведения анализа потоков $E\tau a$ на уровне отдельных контуров, занятых орошаемыми агроценозами на географическом экстенде сельской местности МР в исследуемый период 2003–2017 гг., был создан набор слоев границ земельных участков, орошение которых осуществлялось с помощью ДМ-КД. Для этого были использованы открытые данные космосъемки в видимом диапазоне, полученные аппаратурой КА Landsat 4,5,7,8 (веб-сервис Earth Explorer геологической службы США) за вегетационные периоды каждого исследуемого года. Дешифровочным признаком мест расположения ДМ-КД являлись отображения контуров земельных участков кругового очертания, сформированные в результате орошения агроценозов. Использование этого признака при идентификации местоположений ДМ-КД на RGB-изображениях в среде ArcGIS Pro 2.8 позволило оцифровать внешние границы соответствующих i -х геообъектов в каждый конкретный j -й год исследованного диапазона лет, вычислить координаты местоположения центральной опоры (x_i, y_i) , и их геометрические характеристики, включая площадь $S(Ir_{i,j})$.

На заключительном шаге все созданные шейп-файлы масок ДМ-КД были использованы для формирования 15 слоев, соответствующих годам исследованного диапазона 2003–2017 гг., динамика площадей которых представлена на рисунке 2.28а. Картографическое отображение сформированных 15 слоев масок ДМ-КД представлено на рисунке 2.18 (б-р).

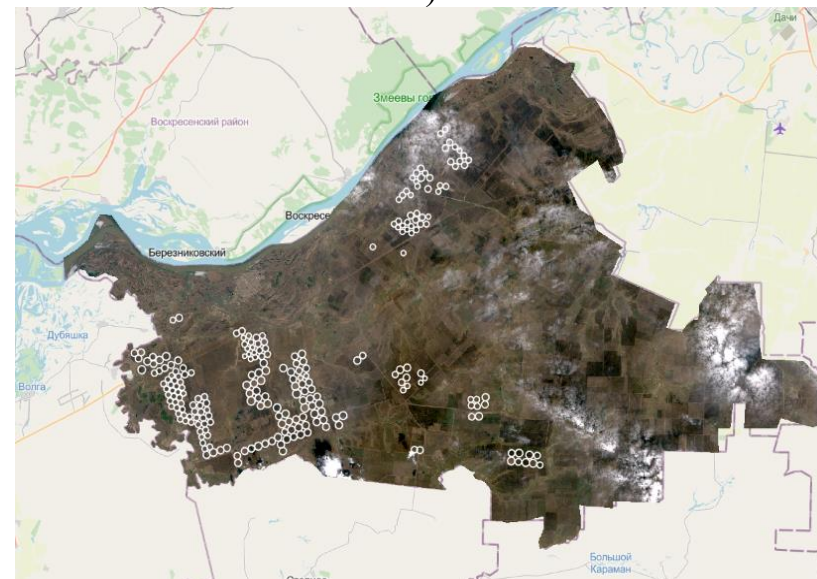
а)



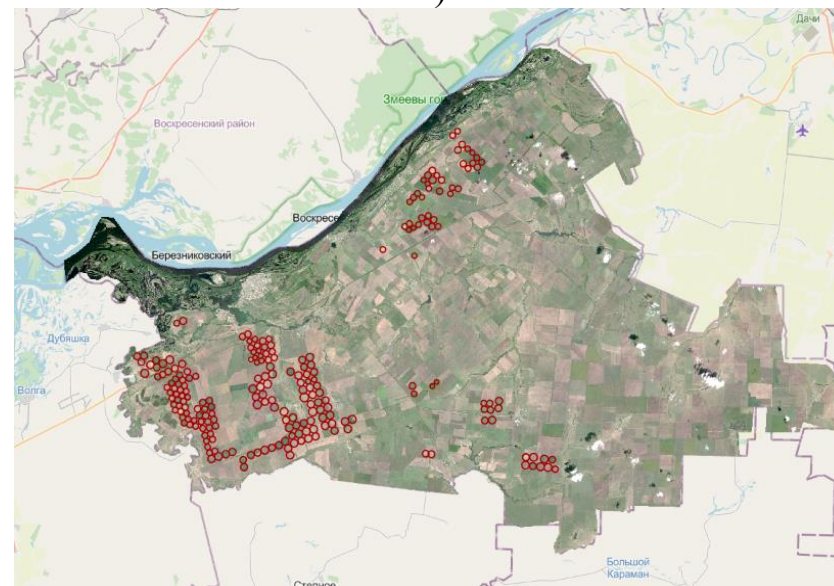
в)



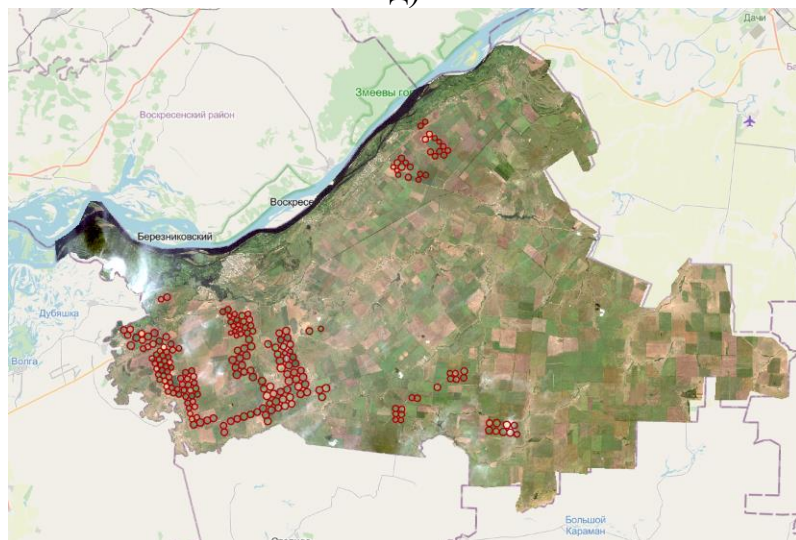
б)



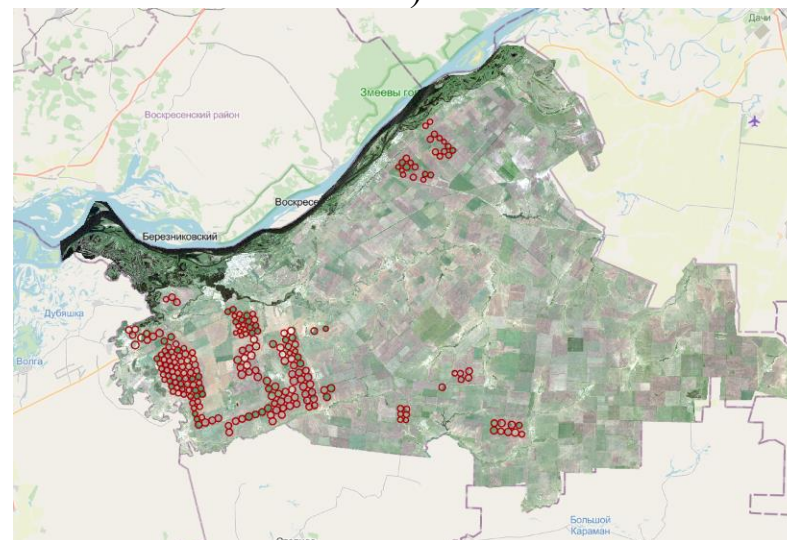
г)



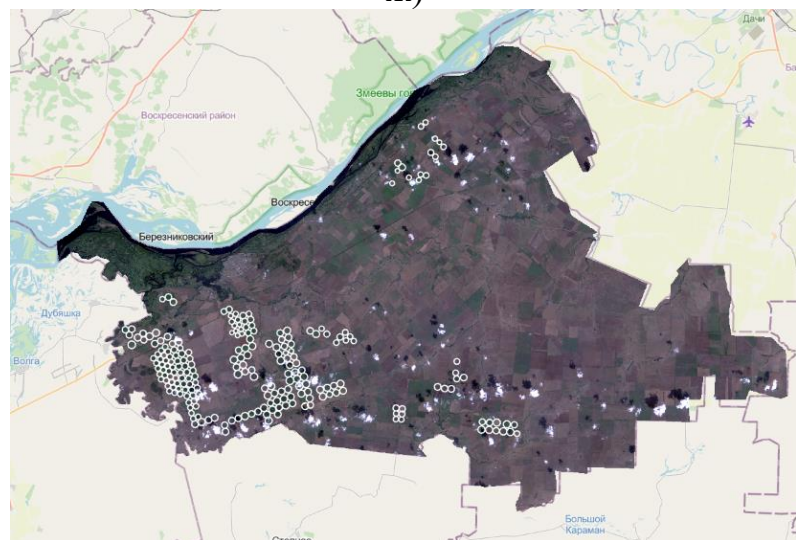
д)



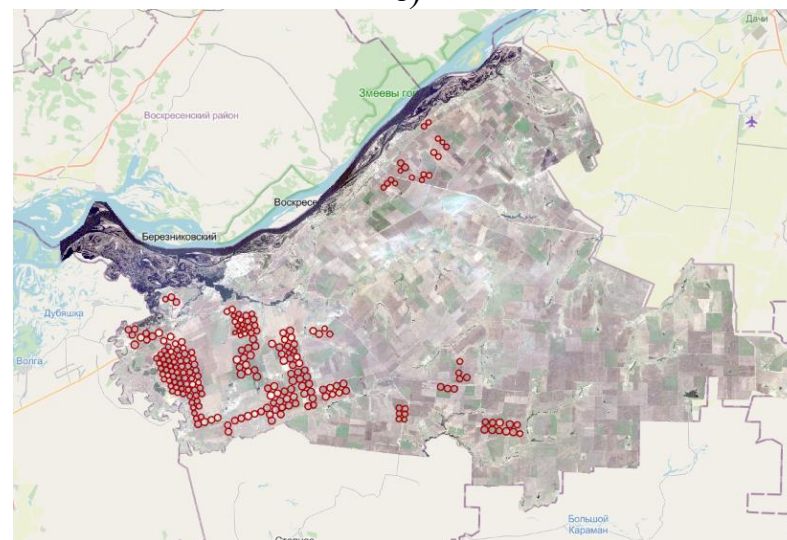
е)



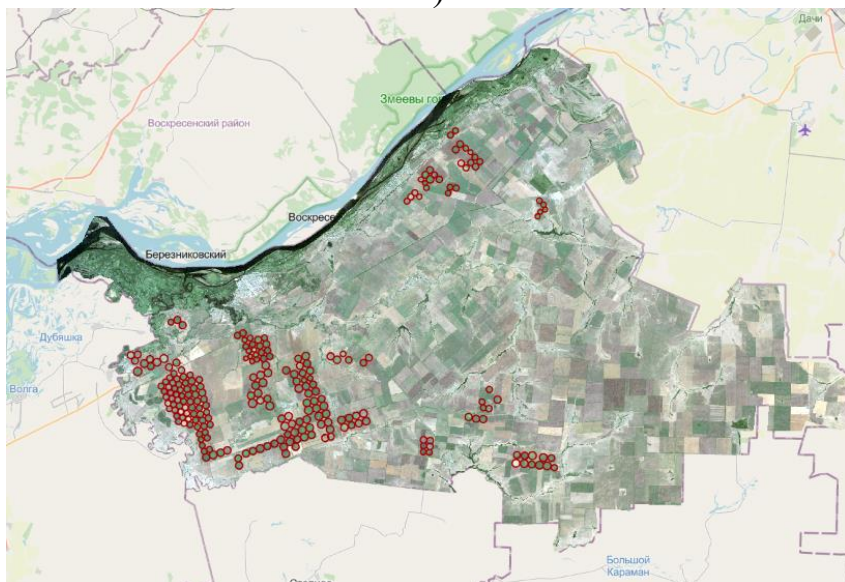
ж)



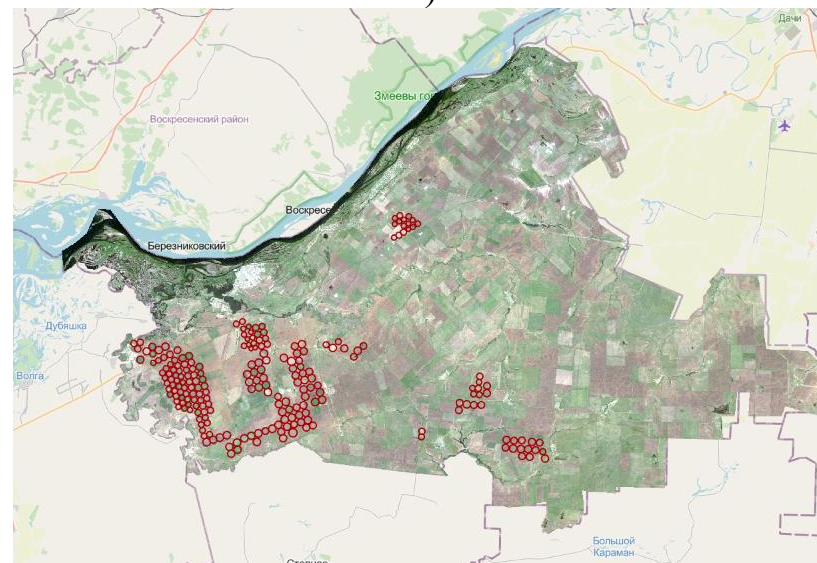
з)



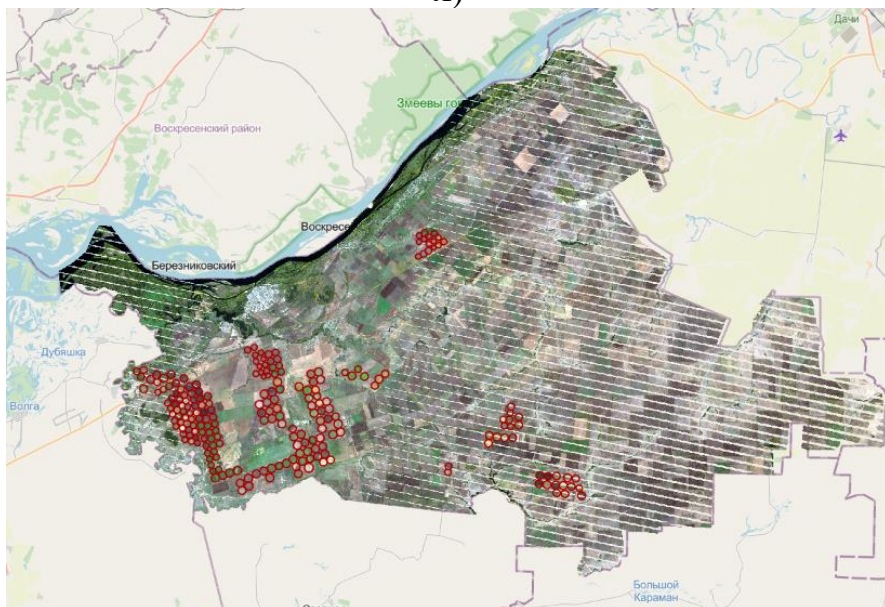
и)



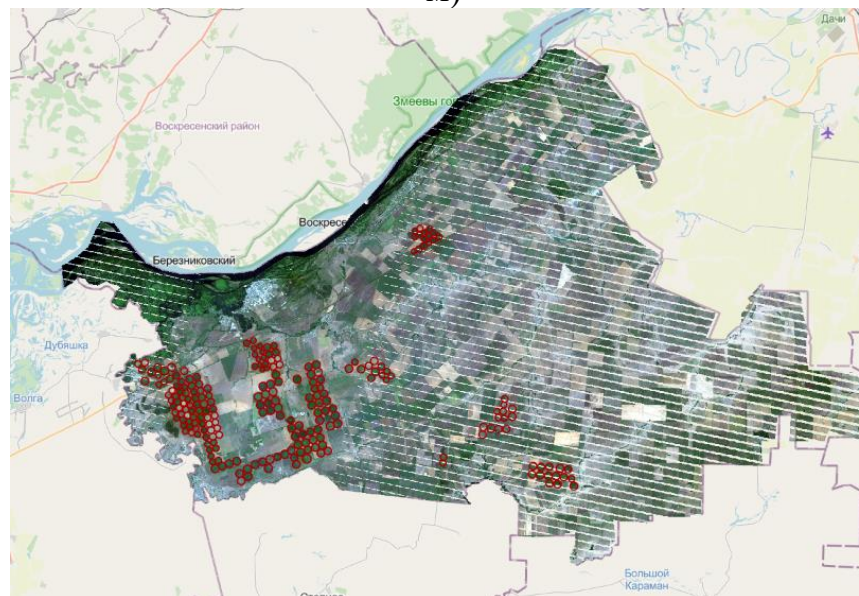
к)



л)



м)



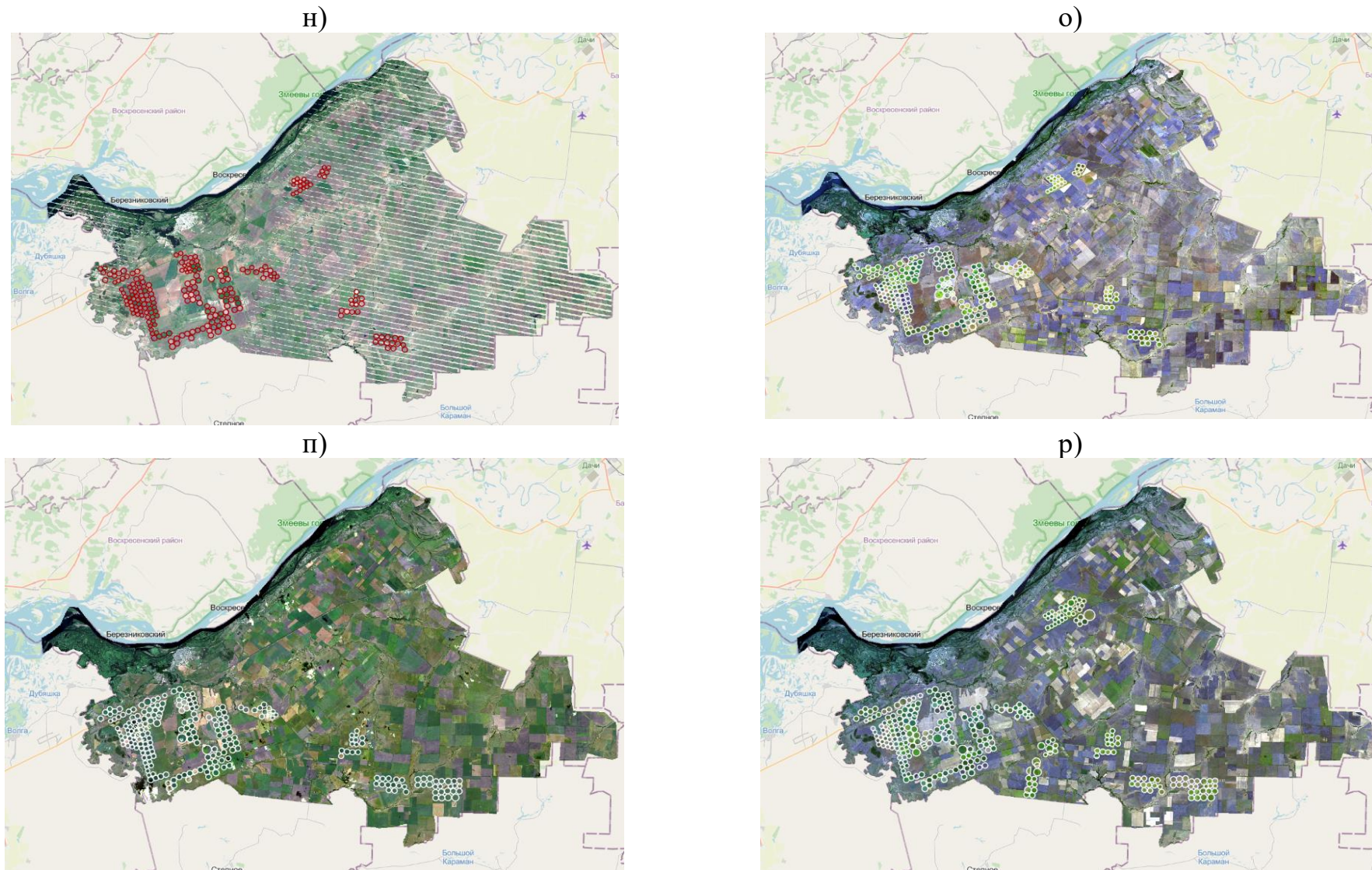


Рисунок 2.18 – Диаграмма временного ряда идентифицированных контуров ДМ-КД (а) и наборы слоев (ОГ.2) масок ДМ-КД (отображены, или красным, или белым цветом поверх RGB-снимков КА Landsat 4,5,7,8): б) 23.04.2003; в) 23.08.2004; г) 07.06.2005; д) 26.06.2006; е) 24.05.2007; ж) 15.07.2008; з) 01.05.2009 ; и) 07.07.2010; к) 23.05.2011; л) 22.09.2012; м) 07.07.2013; н) 23.05.2014; о) 07.09.2015; п) 07.07.2016; р) 12.09.2017

Сопоставление созданных слоев ежегодных масок ДМ-КД выявило наличие отличий, которые в первой и второй трети периода проведенных исследований были незначительными, а в его последней трети — существенными. В целом это соответствовало динамике изменений инфраструктуры обеих оросительных систем (Комсомольской и Приволжской). В первые две трети этого периода происходил, в основном, вывод ДМ-КД из эксплуатации из-за создавшихся локальных условий (подъем уровня грунтовых вод выше критического, вторичное засоление и осолонцевание почвенного покрова), что не позволяло вести эффективное орошаемое земледелие на соответствующих контурах. Также имела место замена старых моделей на технически более современные в связи с их моральным и/или техническим устареванием. Иная ситуация сложилась в последнюю треть исследованного периода, когда происходила интенсификация орошения за счет замены старых моделей на новые, а также наблюдался экстенсивный рост за счет установки ДМ-КД на тех местах, на которых в предшествующие годы исследованного периода не были идентифицированы соответствующие ДМ-КД. Отметим, что отмеченное развитие, включающее интенсивную и экстенсивную компоненты, было во многом связано с государственным субсидированием приобретения новой дождевальной техники в рамках реализации Федеральной целевой программы "Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы" [55, 68].

2.4 Характеристики гидрометеорологического мониторинга станции г. Ершов

В настоящем разделе, посвященном анализу метеорологических характеристик погоды на географическом пространстве Марковского района, из-за отсутствия данных в открытом доступе за исследуемый период 2003–2017 гг. на метеостанции г. Маркс, были использованы соответствующие ряды метеостанции г. Ершов, которые находятся в открытом доступе на сайте Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды <http://meteo.ru/> [7]. Общая

черта проведенного анализа заключалась в использовании инструментов ПО Excel MS для построения необходимых картограмм, а также расчета характеристик линейных функций тренда.

2.4.1 Характеристики рядов среднемесячной нормы осадков

Временные ряды среднемесячных норм осадков г. Ершов двенадцати месяцев календарного года за исследуемый период 2003–2017 гг. представлены на рисунке 2.19 в виде набора диаграмм рассеяния коробчатого вида.

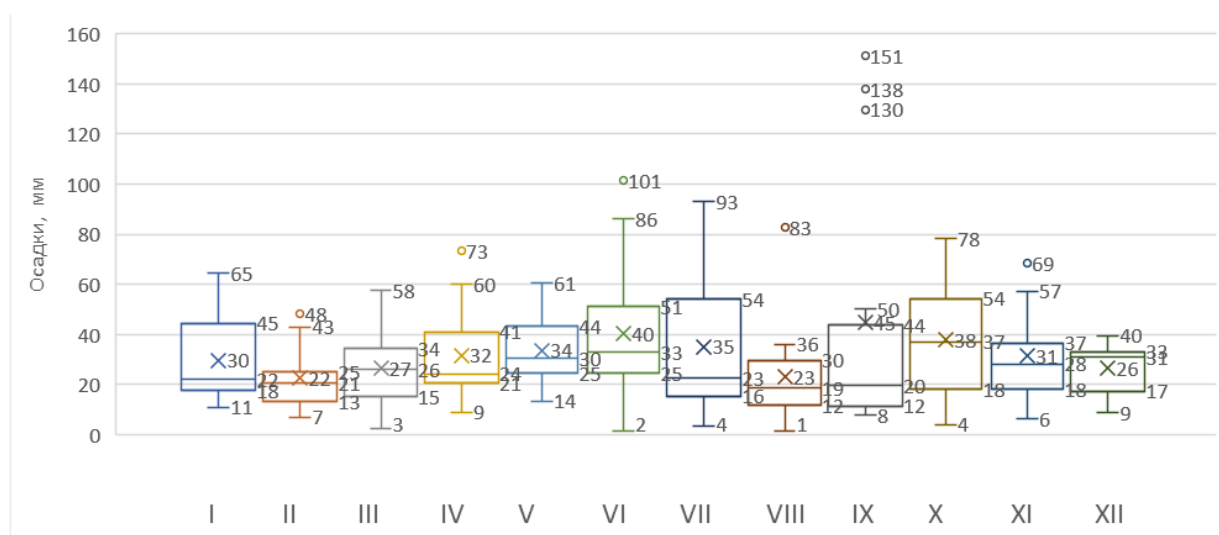


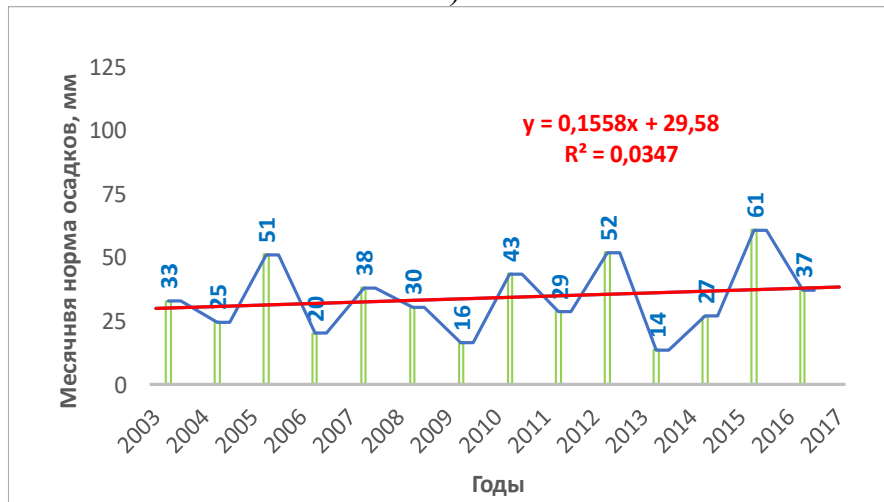
Рисунок 2.19 – Набор диаграмм рассеяний рядов месячных норм осадков метеостанции г. Ершов за исследуемый период 2003–2017 гг.

Анализ характеристик диаграмм рассеяния среднемесячных норм осадков за май, июнь июль и август (рисунок 2.19) выявил, что первым трем из них (май-июль) соответствуют распластанные, ассиметричные формы с медианными значениями (34, 40 и 35 мм, соответственно), превышающими средние значения (24, 30 и 33 мм, соответственно), в то время как августу соответствует компактная, симметричная форма с близкими значениями среднего и медианы (23 мм). Анализ выбросов за пределы второй квантили показал их наличие в июне (101 мм) и в августе (83 мм).

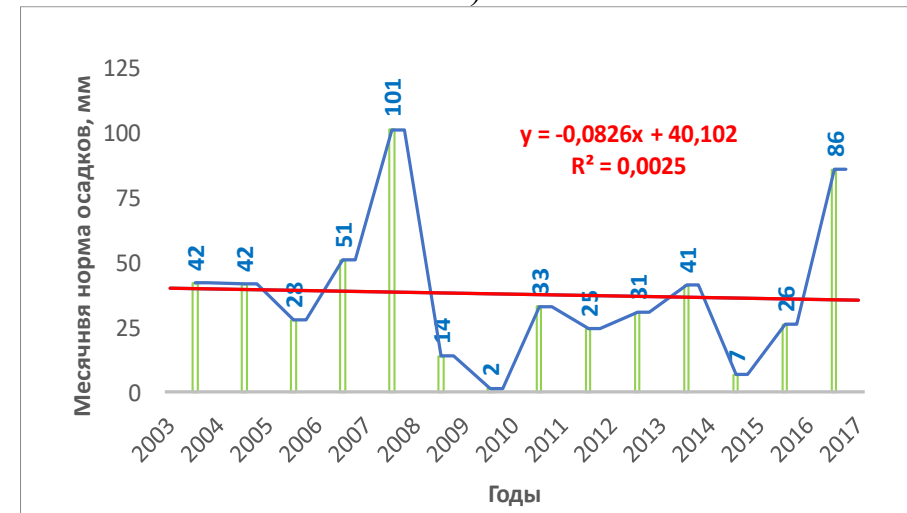
Для оценки тренда норм месячных осадков (май-август) были построены диаграммы временных рядов (рисунок 2.20), на которых отображены рассчитанные

характеристики соответствующих линейных трендов. Значения скоростей этих трендов свидетельствуют о том, что в течении 2003-2017 г. происходило: а) увеличение норм осадков в мае со средней скоростью 0,16 мм/год; б) убывание норм осадков в июне со средней скоростью 0,08 мм/год; в) убывание норм осадков в июле со средней скоростью 0,79 мм/год; г) убывание норм осадков в августе со средней скоростью 0,25 мм/год. При этом анализ отмеченных на рисунке 2.15 выбросов показал, что первый выброс имел место в июне 2008 г. (рисунок 2.20 б), а второй — в августе 2009 г. (рисунок 2.20 г).

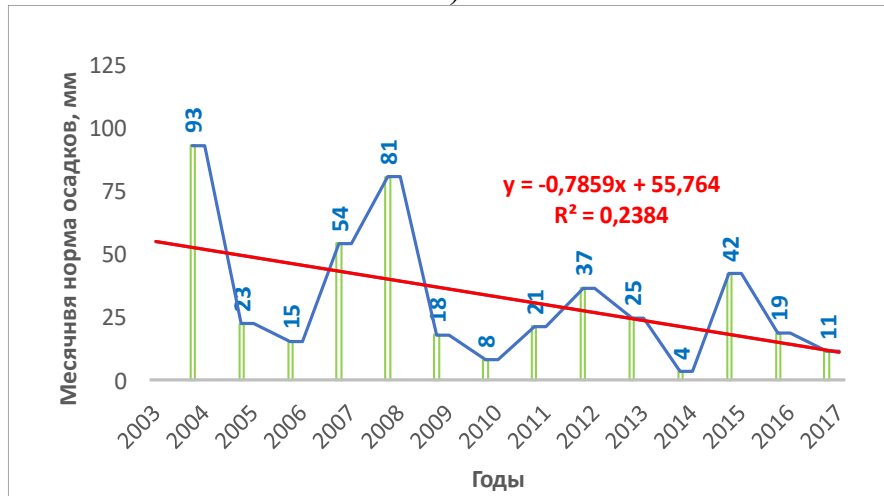
а)



б)



в)



г)

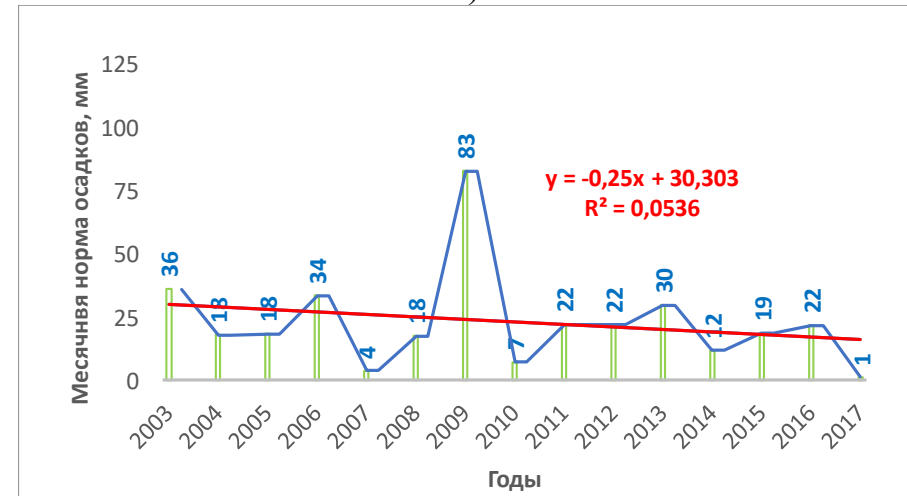


Рисунок 2.20 – Набор диаграмм временных рядов месячных норм осадков по данным метеостанции г. Ершова и функции их линейных трендов за период 2003–2017 гг.: а) май; б) июнь; в) июль; г) август

2.4.2 Характеристики трендов сумм суточных температур воздуха

Анализ временных рядов сумм суточных температур воздуха четырех месяцев (май-август), измеренных на метеостанции г. Ершов за исследуемый период 2003–2017 гг. (рисунок 2.21), выявил положительные значения скоростей тренда всех четырех исследуемых месяцев, наибольшие значения которых 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).

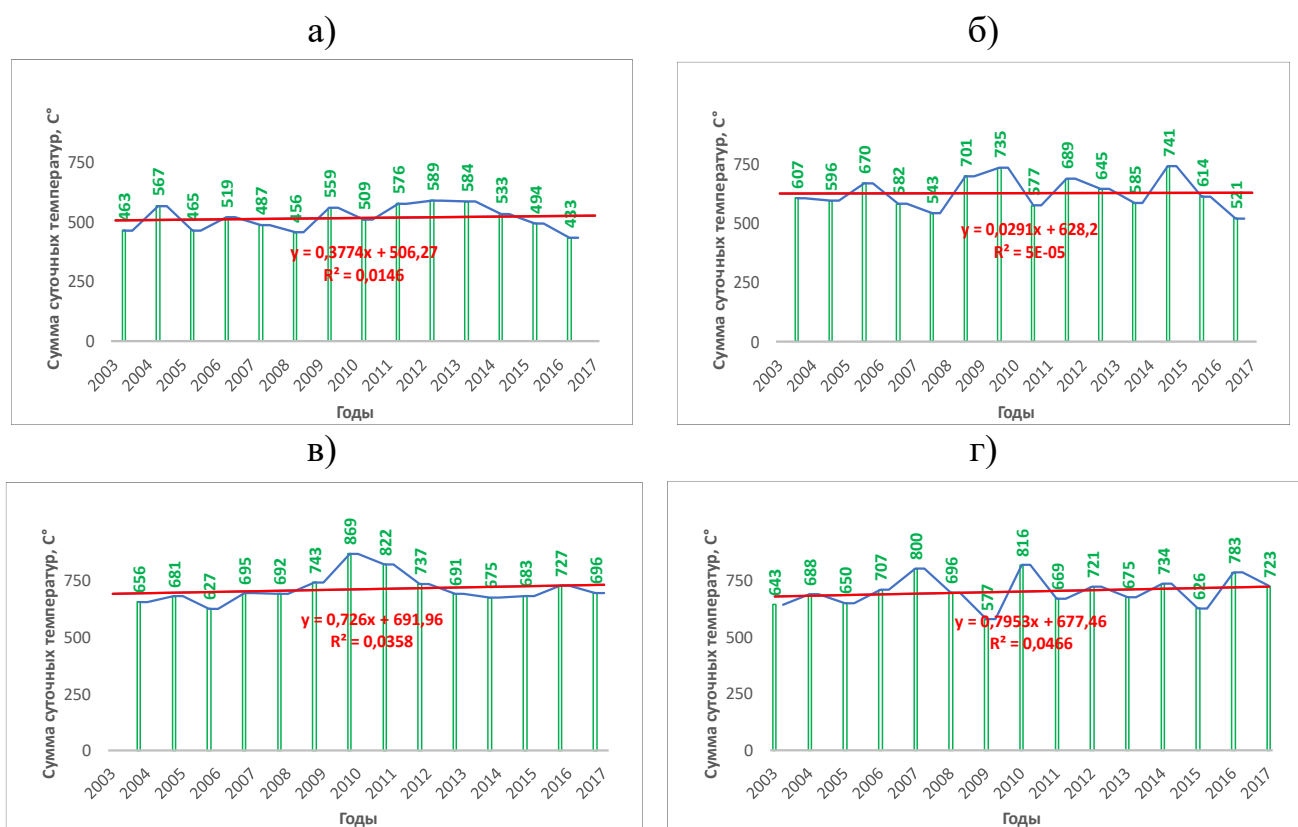


Рисунок 2.21– Набор диаграмм временных сумм суточных температур по данным метеостанции г. Ершов и их линейные тренды за период 2003–2017 гг.: а) май; б) июнь; в) июль; г) август

2.4.3. Характеристики рядов испаряемости (по Иванову)

Оценка влияния метеорологических характеристик приземного слоя атмосферы на формирование потока испарения с водной поверхности (испаряемости) за четыре исследованных месяца в период 2003–2017 гг. была

проведена по зависимости Иванова (1.9) [33]. Полученные при этом временные ряды, рассчитанные по соответствующим среднемесячным значениям температуры и влажности воздуха метеостанции г. Ершов (рисунок 2.22) имеют внешнюю схожесть с временными рядами среднемесячных температур воздуха; (рисунок 2.21), а также аналогичные по направленности скорости трендов с наибольшими значениями, приходящимися на май, июль и август (3,05, 1,96 и 2,15 мм/год, соответственно), а наименьшими – на июнь (1,43 мм/год). Аналогичная оценка величины испаряемости за четыре исследованных месяца за 2003–2017 гг. показала ее увеличение с 520 до 600 мм.

Оценка изменения испарения с водной поверхности за три летних месяца исследованного периода 2003–2017 гг., проведенная с использованием рассчитанных характеристик соответствующих трендов, показала увеличение этого параметра с 520 мм до 600 мм, что свидетельствует об аридизации погодных условий.

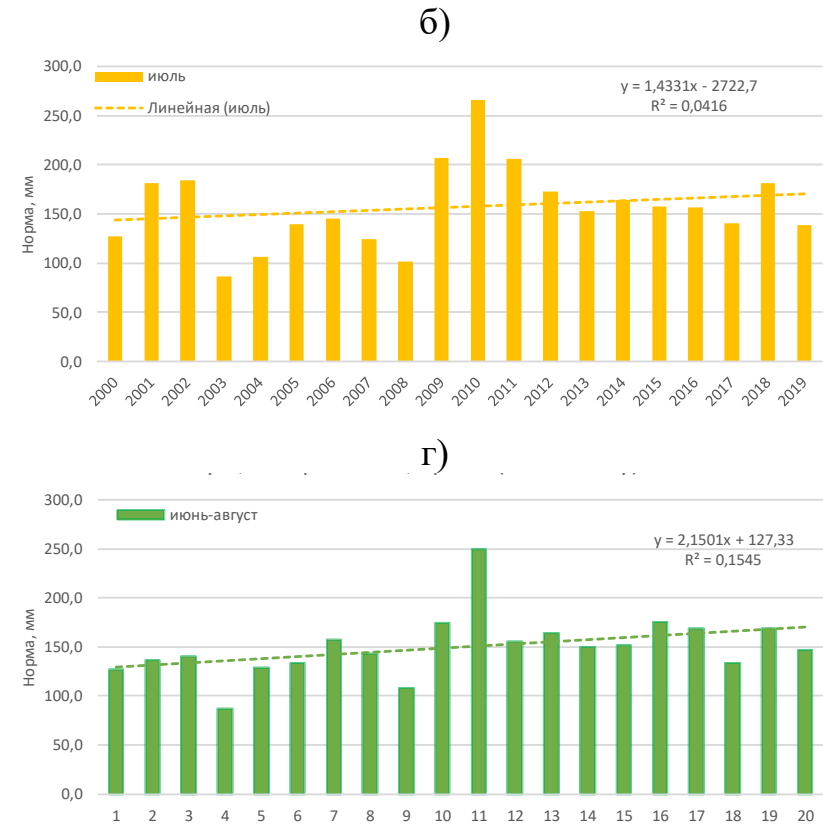
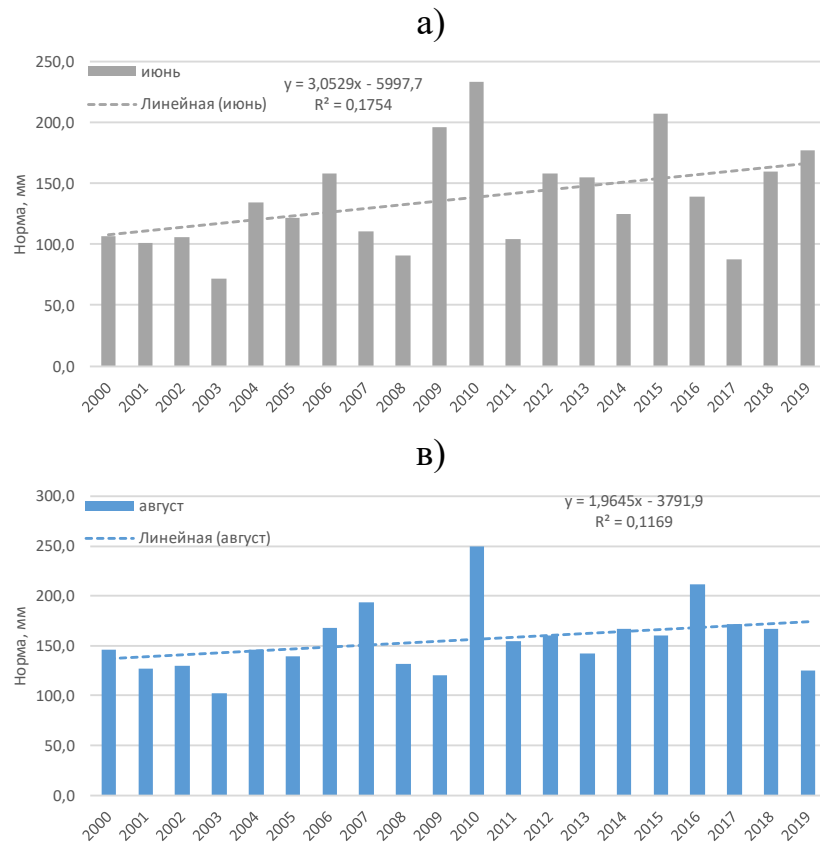


Рисунок 2.22 – Набор диаграмм профилей временных рядов испарения с водной поверхности (метеостанция г. Ершов, 2003–2017 гг.), а также характеристики функций их линейных трендов: а) июнь; б) июль; в) август; г) июнь-август

2.4.4 Характеристики рядов гидротермического коэффициента Селянинова

Для интегральной оценки гидротермического режима вегетации на географическом экстенде Марковского района (2003–2017 гг.) был использован гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова [64], величина которого рассчитывается, или для отдельных месяцев вегетации, или для их комбинаций, с использованием значений суммы осадков R [мм] и суммы активных температур $\sum t$ [C°], превышающих 10 C°,

$$K = \frac{10 \cdot R}{\sum t}, \quad (2.1)$$

Результаты расчетов ГТК по выражению 2.1 с использованием рядов среднемесячных значений температуры воздуха и норм осадков метеостанции г. Ершов четырех месяцев (май, июнь, июль, август) представлены в виде диаграмм соответствующих рядов на рисунке 2.23(а-в). Вид этих рядов в целом схож с аналогичными рядами среднемесячных норм осадков (2.20). При этом аналогичность направленности значений трендов всех четырех месяцев свидетельствует о преобладании изменчивости среднемесячных норм осадков над изменчивостью среднемесячных температур воздуха.

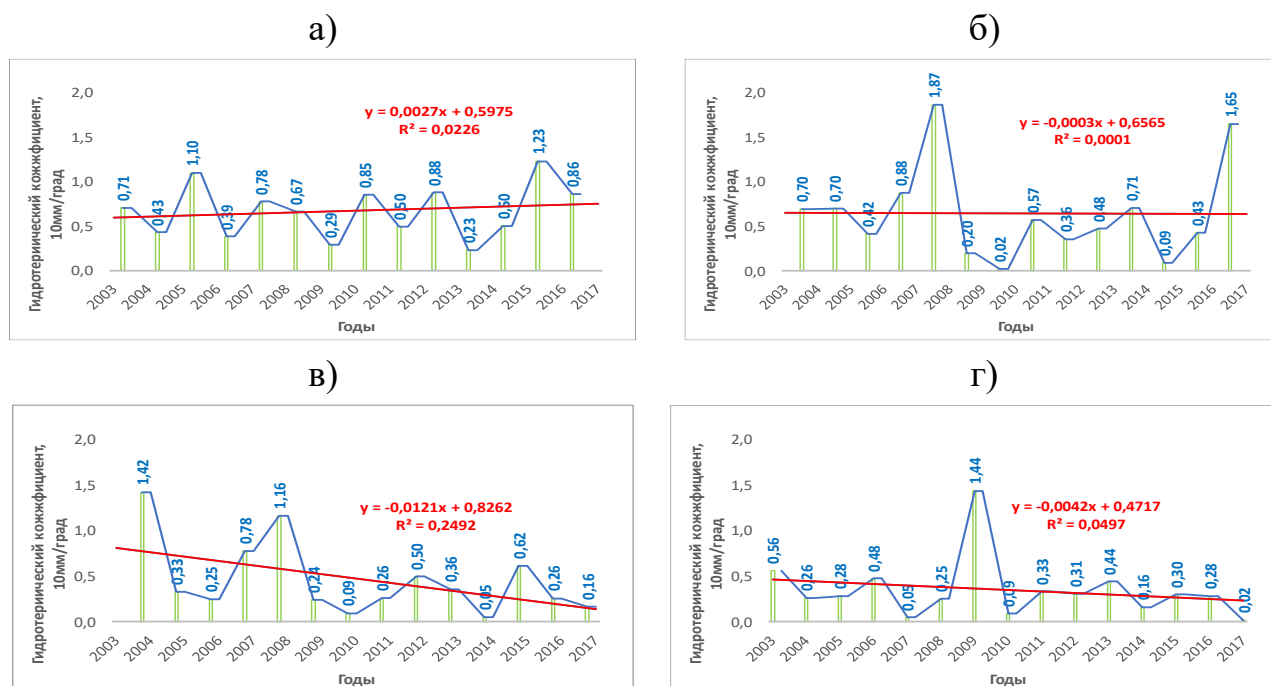


Рисунок 2.23 – Набор диаграмм временных рядов ГТК Селянинова (метеостанция г. Ершова, 2003–2017 гг.) и функций линейных трендов: а) май; б) июнь; в) июль; г) август

В соответствии с классификацией значений ГТК, увеличение их значений в мае, а также незначительное уменьшение в июне не отразилось на его соответствии зоне сухого земледелия ($0,5 < \text{ГТК} < 0,7$). В то же время значительное уменьшение значений ГТК в июле и августе привело к смещению из зоны сухого земледелия в зону ирригации ($\text{ГТК} < 0,5$). Соответствующая интегральная оценка агрометеорологических условий летних месяцев представлена на рисунке 2.24.

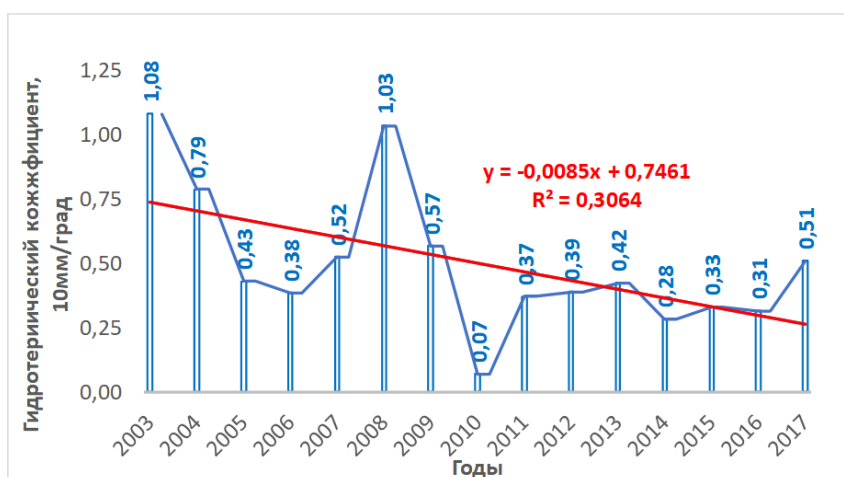


Рисунок 2.24 – Диаграмма временного ряда значений ГТК Селянинова (метеостанция г. Ершов) летних месяцев и функции его линейного тренда

Диаграмма временного ряда ГТК Селянинова за период 2003–2017 гг. (рисунок 2.24) характеризуется тремя частями: 1) симметричной полуволной (2003–2008 гг.) с минимумом в 2006 году; 2) несимметричной волной (2008–2013 гг.) с минимумом в 2010 году; 3) несимметричной волной (2013–2017 гг.) с минимумом в 2014 году. Интегральная оценка за весь период 2011–2017 гг. свидетельствует об уменьшении значений ГТК Селянинова, которые в начале этого периода соответствовали зоне сухого земледелия ($0,5 < \text{ГТК} < 0,7$), а к его концу – зоне ирригации ($\text{ГТК} < 0,5$). Это подтверждает результаты анализа рядов испаряемости (по Иванову), рассчитанных по данным метеостанции г. Ершов и свидетельствующих об увеличении аридизации климата.

2.5. Полевая верификация оценки потока актуального восьмидневного суммарного испарения $ETa8$

В целях верификации результатов оценки потоков $ETa8$ по данным ДЗЗ на географическом экстенде сельской местности Марковского района были использованы данные наземного полевого мониторинга влажности корнеобитаемого слоя почвенного покрова, полученные на экспериментальном участке с многолетним посевом орошаемой люцерны в вегетационные периоды 2006–2009 гг.

2.5.1. Краткая характеристика экспериментального участка многолетнего мониторинга влагозапасов почвенного покрова

Экспериментальный участок наземного полевого мониторинга влажности КС-ПП, включавший 6 опытных площадок (6х2 м), был расположен на территории, расположенной между двумя производственными посевами люцерны, орошаемыми ДМ «Фрегат» кругового действия (рисунок 2.25), принадлежавших агрофирме «Михайловское». Его местоположение соответствовало нижнему склону третьей Хвалынской террасы с относительно плоским выравненным рельефом, небольшими западинами, а также небольшим уклоном порядка 0,1% в направлении к р. Волге [23].

Для морфологического описания почвенного покрова экспериментального участка, а также отбора образцов для лабораторных анализов, в репрезентативном местоположении этого участка был заложен почвенный разрез. Характеристики гранулометрического состава почвенных образцов, отобранных в трехкратной повторности, согласно, ГОСТ 12536–79 [13] и содержания органического вещества, согласно ГОСТ 26213–91 [14], представлены в таблице А.1, Приложение А. По результатам морфологического описания почвенного разреза и проведенных анализов, было установлено, что характеристики почвы экспериментального

участка соответствуют тёмно-каштановой почве среднесуглинистого состава в соответствии с классификацией Н.А. Качинского [39].

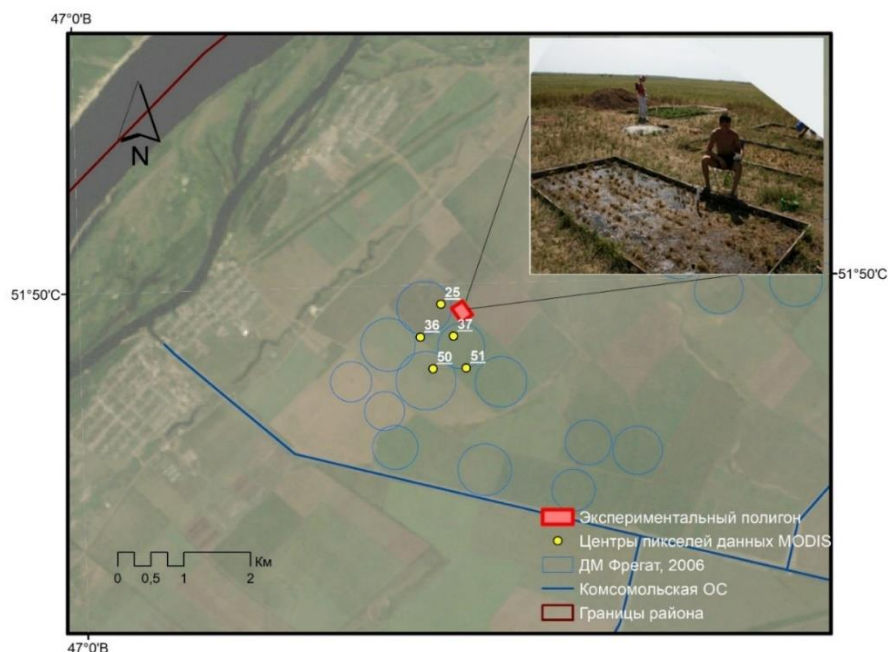


Рисунок 2.25 –Изображения экспериментального участка полевого мониторинга влагозапасов КС-ПП: местоположение и процесс мониторинга

2.5.2 Методика наземного мониторинга влагозапасов почвенного монолита

Мониторинг влагозапасов КС-ПП на 6 экспериментальных площадках был реализован влагомером (профилометром влажности почв) TRIME–FM фирмы «IMKO micromoduletechnik, GmbH» [234]. Для тестирования его показаний были проведены эксперименты на двух типах искусственно созданных почвенных монолитов: 1) «малых» высотой 30 см и поперечными размерами 20x20 см с однородными профилями влажности; 2) «больших» высотой 90 см и поперечными размерами 100x100 см с профилями влажности, соответствующим послеполивным и межполивным периодам. Для формирования монолитов обоих типов была использована смесь почвенной массы горизонтов A_1 и B_1 . В результате тестирования на серии «малых» почвенных монолитов, значения влажностей которых варьировали в диапазоне от полной влагоемкости (ПВ) порядка 40–45% до влажности завядания (ВЗ) порядка 14–15%, была показана высокая

воспроизводимость этих влажностей результатами измерений, проведенных посредством TRIME-FM.

Тестирование показаний TRIME-FM для случаев профилей влажности разнообразных форм было проведено на «больших» почвенных монолитах с обсадной пластиковой трубой диаметром 5 см в их центре, предназначенной для вертикального перемещения этого прибора. Для исключения испарения с верхней, боковых и нижней поверхностей монолита, эти поверхности были покрыты водонепроницаемой полиэтиленовой пленкой, которая также использовалась для перекрытия поверхности смежных горизонтальных слоев с целью исключения вертикального межслоевого перетока почвенной влаги. Формирование заданных стационарных профилей влажности проводилось послойно по 5 см с отделением соседних слоев полиэтиленовой пленкой. Формирование заданных стационарных профилей влагозапасов на этих монолитах проводилось послойно по 5 см с отделением соседних слоев полиэтиленовой пленкой. Доведение влажности каждого из слоев до заданного влажности осуществлялось послойной укладкой односантиметровых слоев с их увлажнением пульверизатором и трамбованием. При разборке монолита из всех горизонтов на удалении 10 см от обсадной трубы образцы отбирались режущими кольцами с восьмикратной повторностью для лабораторного определения объемной влажности. Сопоставление полученных экспериментальных данных с заданными показало высокую степень сопоставимости.

Результаты проведенных сеансов измерений профилей влажности «больших» монолитов прибором TRIME-FM и их анализ позволили оценить высоту активной зоны этого прибора, которая оказалась равной 15 см. Для получения результатов измерений с их послойной детализацией была разработана методика послойного пятисантиметрового сканирования. Ее использование для детализации профилей влажности, сформированных в «больших» монолитах, показало удовлетворительное соответствие рассчитанных и заданных профилей влажностей [25]. Это позволило использовать разработанную методику при проведении полевого мониторинга 2006–2009 гг. на шести экспериментальных

площадках, которые соответствовали концепции неотрывных почвенных монолитов [25, 31, 59, 67], для расчета профилей влагозапасов, необходимых для оценки потоков ETa по уравнению водного баланса (1.1).

2.5.3. Методика наземного полевого точечного мониторинга влагозапасов почвенного покрова

В целях формирования на шести экспериментальных площадках водного режима, сходного с водным режимом рядом расположенных производственных посевов орошаемой люцерны, поливы на первых синхронизировались с поливами на соседних контурах вторых. Поливы на экспериментальных площадках проводились вручную с использованием десятилитровых леек, с нормами и интенсивностями, аналогичными выдаваемым ДМ «Фрегат». Для мониторинга влажности почвы все шесть экспериментальных площадок были оборудованы скважинами из пластиковых труб диаметром 5 см и длиной 120 см, по которым производилось последовательное перемещение TRIME-FM через каждые 5 см.

Мониторинг метеорологических характеристик 2006–2009 гг. в местоположении экспериментального участка велся посредством автоматической агрометеостанции «ZENO – 3200», установленной на расстоянии порядка 1 км от участка, вблизи насосной станции № 2 КОС. Полученные ряды метеорологических данных (рисунок 2.24) свидетельствуют о том, что вегетационный период (июнь–август) 2007 года характеризовался как средне-засушливый со значением ГТК порядка 0,6; в 2008 году — как умеренно влажный с ГТК порядка 0,8; а в 2009 году — снова как средне-засушливый со значением ГТК порядка 0,6. Отметим, что эти значения в среднем на 15–20% превышают значения ГТК, рассчитанные по данным метеостанции г. Ершов, что могло быть вызвано более высокими нормами осадков в местоположении этой агрометеостанции вблизи р. Волги.

Результаты мониторинга влажности ПП на шести экспериментальных площадках (пл 2; пл 4; пл 1; пл 3; пл 5; пл 7) в период 2006–2009 гг. (рисунок 2.26) представлены с помощью трехмерных диаграмм, построенных в ПО Sigma Plot. На

этих диаграммах влажности отображены областями, закрашенными между соседними хроноизоплетами, где ось абсцисс соответствует календарному времени, а ось ординат — глубине.

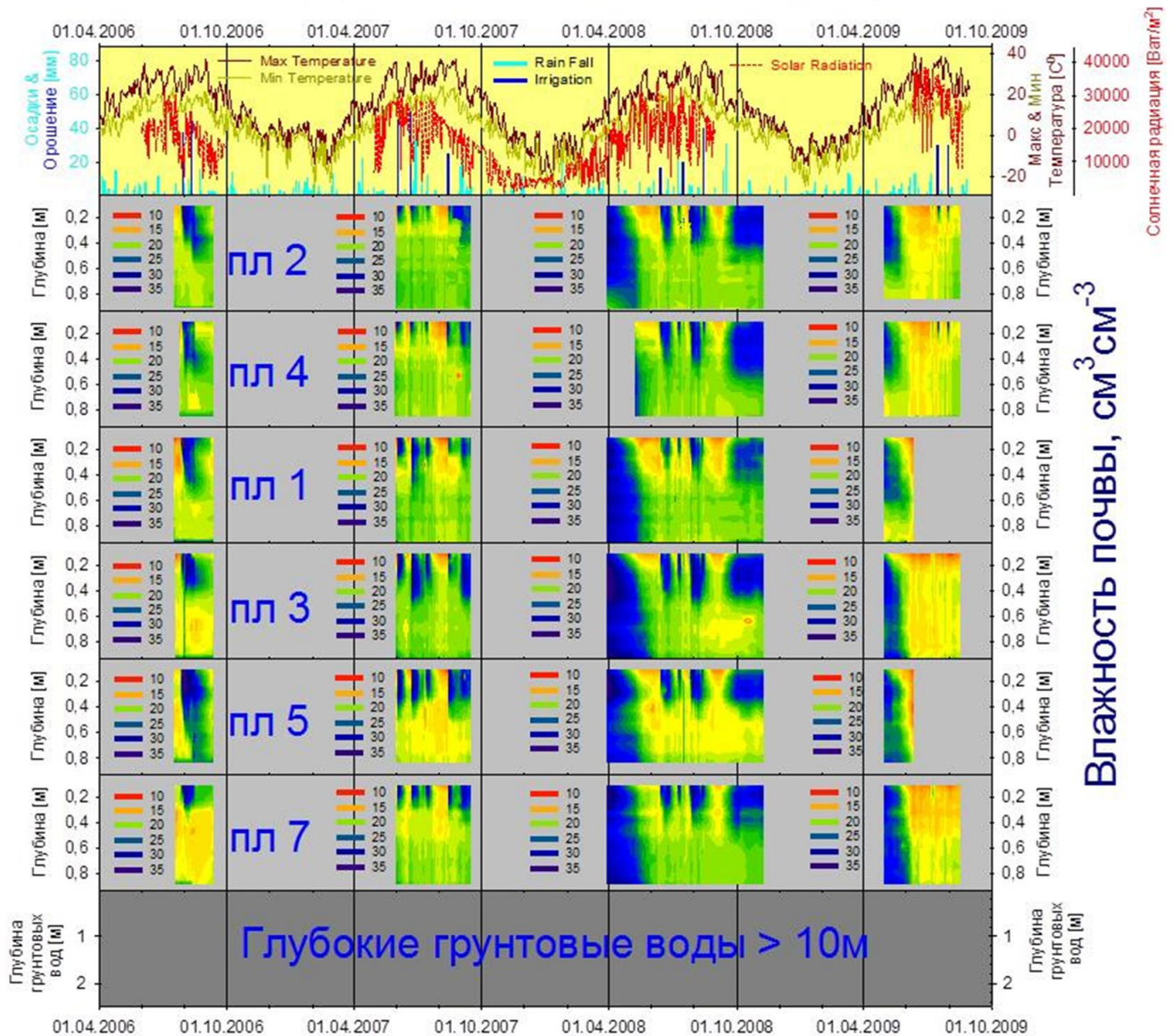


Рисунок 2.26 – Мозаика наборов данных мониторинга метеорологических данных (метеостанция ZENO – 3200) и влажности почвенного покрова (TRIME-FM) шести экспериментальных площадок в период 2006–2009 гг.

Визуальный анализ результатов мониторинга (рисунок 2.26) свидетельствует об образовании преференциального потока воды, отображенного вертикальными тонкими областями голубого цвета, идущими сверху вниз, в периоды, следующие сразу после начала поливов, а также выпадения дождевых осадков.

2.5.4. Сопоставление оценок потоков ETa , полученным по данным наземного и космического мониторинга

Расчет потоков ETa по данным наземного мониторинга был проведен для 2007 и 2008 годов, в которые имелся полный набор данных мониторинга на шести экспериментальных площадках в соответствующих вегетационных периодах. Для оценки этих потоков в межполивные периоды использовался метод инверсии водного баланса (1.1). Полученные при этом значения для интервалов между соседними сеансами измерений были просуммированы по интервалам, соответствующим продукту MOD16A2, сформированному по результатам ДЗЗ. В результате для каждой из шести экспериментальных площадок были получены временные ряды: а) восьмидневных потоков $ETa_{8д}$ (рисунок 2.27 а, в), рассчитанных по результатам наземного точечного мониторинга влагозапасов на шести экспериментальных площадках; б) восьмидневных потоков ETa_8 (рисунок 2.27 б, г), полученных для пикселей продукта MOD16A2, расположенных внутри контуров двух соседних посевов люцерны, орошаемых ДМ «Фрегат».

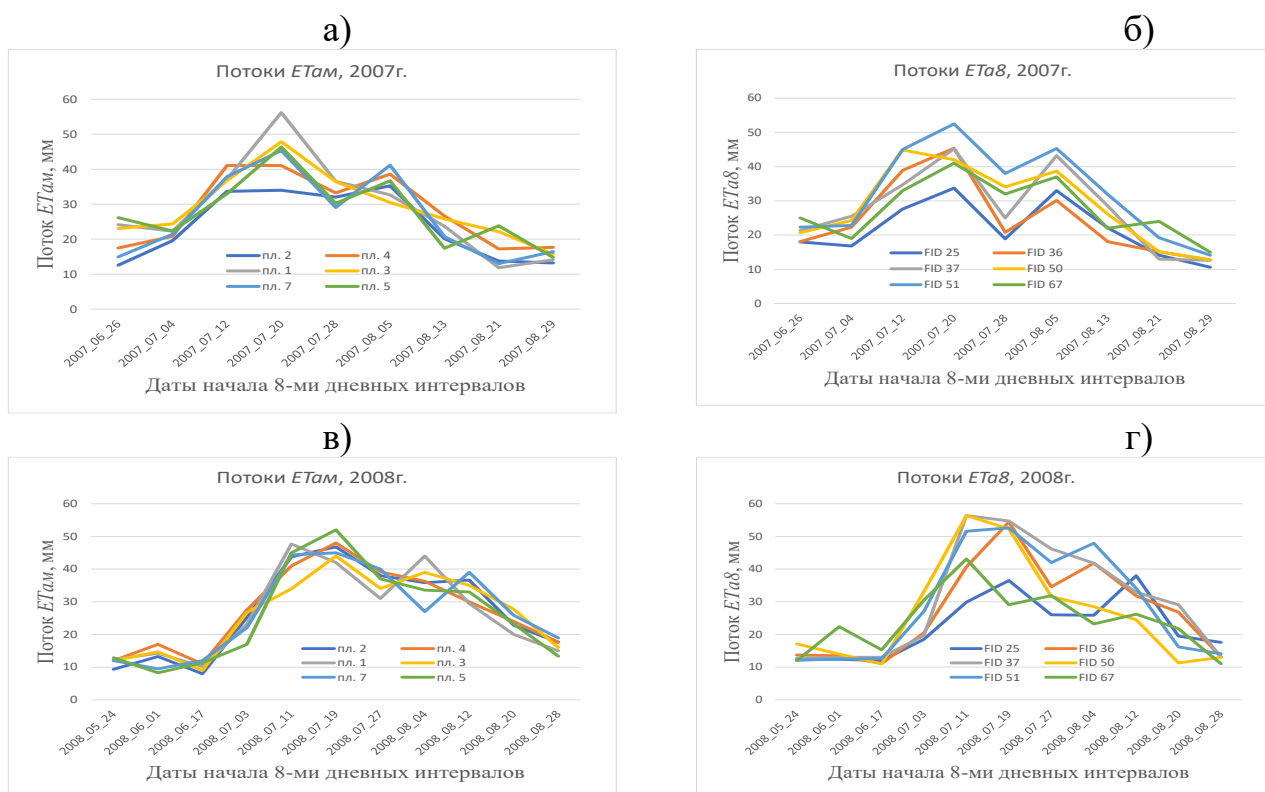


Рисунок 2.27 – Набор диаграмм временных рядов потоков: а) $ETa_{8д}$ за 2007 г.; б) ETa_8 за 2007 г.; в) $ETa_{8д}$ за 2008 г.; г) ETa_8 за 2008 г.

В целом, представленные на рисунке 2.27 профили потоков $ET_{ам}$, рассчитанные по методике инверсии уравнения водного баланса (1.1), и синхронизированных с ними во времени профили потоков $ET_{а8}$ продукта MOD16A2, имеют схожий внешний вид. При этом стоит отметить более плотное расположение профилей потоков $ET_{ам}$ в сравнении с профилями потоков $ET_{а8}$, что по всей видимости связано с разным пространственным масштабом оценок соответствующих потоков: первый из них имеет дециметровое разрешение, а второй – разрешение порядка сотни метров.

Количественная оценка близости временных рядов потоков $ET_{ам}$ и $ET_{а8}$ была основана на корреляционном анализе. Для этого в программе MS Excel были построены диаграммы попарных значений потоков $ET_{ам}$ и $ET_{а8}$ двух наборов за 2007 г и 2008 г. (рисунок 2.28), а также рассчитаны соответствующие характеристики функции линейной корреляции. Полученные при этом значения коэффициентов парной корреляции (коэффициенты Спирмена) временных рядов $ET_{ам}$ и $ET_{а8}$ за 2007 и 2008 года, близкие к единице (соответственно, 0,951 и 0,969), свидетельствует о высокой степени их сопоставимости.

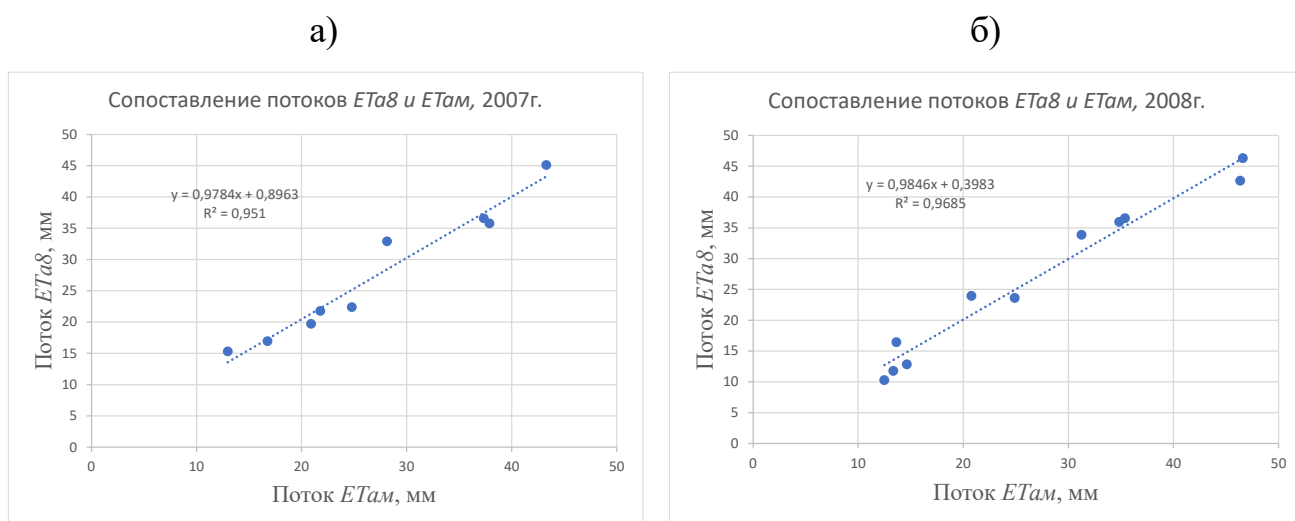


Рисунок 2.28 – Диаграммы функций попарных значений наборов потоков $ET_{ам}$ и $ET_{а8}$: а) 2007 г.; б) 2008 г.

Результаты представленного количественного анализа результатов наземного точечного и космического площадного мониторинга потока $ET_{а}$ для одного и того же местоположения свидетельствуют о высокой степени их взаимного соответствия.

Выводы по второй главе:

1. Для решения задачи 2 проведен сбор, систематизация и предварительный анализ большого объема разнородных пространственных и непространственных массивов данных. Для эффективного их использования разработана модель базы геоданных сельской местности Марковского района, научная новизна которой заключается в структуре наборов слоев данных двух типов, а также в методике их наполнения из разнородных источников данных.

2. Анализ характеристик погодных условий по данным мониторинга метеостанции г. Ершов, позволил выявить два полупериода 2003–2010 гг. и 2010–2017 гг. с трендами разной направленности рядов температур воздуха и норм осадков, а также испарения с водной поверхности.

3. Результаты верификации продукта MOD16A2 по данным мониторинга водного баланса в вегетационные периоды 2007–2008 гг., полученные на шести экспериментальных площадках орошаемой люцерны, свидетельствуют о применимости геоданных этого продукта для исследований пространственно-временных характеристик потока суммарного испарения ETa на географическом экстенде сельской местности Марковского района.

ГЛАВА 3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОДАТАСЕТА *ETav* ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСТЕНТА СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ МАРКОВСКОГО РАЙОНА (2003– 2017 ГГ.)

В третьей главе представлены результаты использования разработанной модели БГД-МР для решения задачи 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.».

В разделе 3.1 представлена методика формирования геодатасета потока актуального суммарного испарения за оросительный период *ETav*.

В разделе 3.2 представлена методика анализа геодатасета *ETav* с использованием усовершенствованного разведочного анализа данных (РАГеоД), включающего в дополнение к методам статистического анализа геостатистические методы. Приводятся результаты расчетов мер центральной тенденции и рассеяния для слоев геодатасета *ETav*, а также скоростей линейных трендов датасетов *ETav*, соответствующих основным видам землепользования, а также их соответствия функции нормального распределения.

В разделе 3.3 приводится методика статистического анализа геодатасета *ETav* с использованием кластерного анализа и анализа трендов. Приводятся результаты анализа пространственно-временной структуры геодатасета *ETav*, которые позволили идентифицировать ряд значимых геостатистических кластеров, указывающих на связь их местоположений с соответствующими видами землепользования, а также факторами и условиями природного и антропогенного происхождения.

В разделе 3.4 описана методика геостатистического анализа геодатасета *ETav*, также представлены картограммы, полученные с использованием инструмента Optimized Hot Spot Analysis (Оптимизированный анализ горячих

точек), основанный на метриках локального индекса Морана, а также проведен их анализ.

3.1 . Методика формирования геодатасета потока актуального суммарного испарения за оросительный период $ETav$

Для решения задачи 3 был использован созданный геодатасет ETa за оросительные периоды 2003–2017 гг. (ОГ.1, раздел 2.3), состоящий из 195 слоев, каждый из которых соответствует одному из 8 суточных интервалов этого диапазона. Суммированием 13 значений 8 суточных потоков $ETa8$ в интервале со 145-го по 241-й календарный день каждого из 15 исследованных лет были получены 15 производных слоев $ETav$ (ПС.1), включавших 19 837 пикселей, значения которых представляли собой суммарное испарение за оросительный период или как его еще называют – фактическое водопотребление. Таким образом полученный геодатасет включает 19 837 пикселей, приходящихся на географический экстенд СМ-МР. Схематическое изображение этой процедуры представлено на рисунке 3.1.

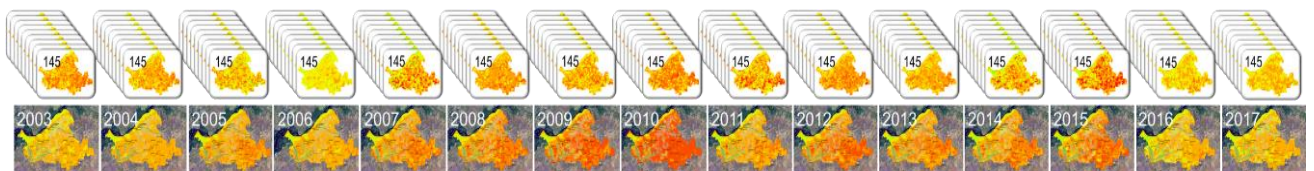


Рисунок 3.1 – Схема формирования 15 слоев $ETav$ за оросительные периоды 2003–2017 гг.

Представленный в нижней части рисунка 3.1 набор картограмм потоков $ETav$ представляет собой пространственно-временное отображение потока суммарного испарения $ETav$ (фактического водопотребления растительного покрова) на территории СМ-МР за оросительные периоды со 145 по 241 календарный день за 2003–2017 гг. Для исследования его структуры, а также оценки его характеристик был использован набор методов, описание которых, а также полученные с их помощью результаты, представлены в нижеследующих разделах.

3.2 Методика анализа характеристик геодатасета *ETav*

В последние годы в задачах, связанных с идентификацией скрытых закономерностей и новых знаний в разнородных скалярных данных (содержащих только одно собственное значение) большого объема (датасетов), широко применяются подходы, основанные на сочетании ряда методов анализа. Один из таких подходов, называемый «разведочный анализ данных» (РАД) [238], применяемый в случаях, когда структура и содержание датасетов характеризуется не только большими объемами, но также их многомерностью и неоднородностью. С этой целью применяются методы, основанные на гистограммах и диаграммах рассеяния, анализе сводных статистик, а также оценках мер центральной тенденции и рассеяния. Однако, для идентификации пространственных и временных закономерностей многослойных геодатасетов, к которым относится сформированный геодатасет *ETav*, перечисленных методов недостаточно и необходимы дополнительные. В связи с этим в целях развития РАД для случая геодатасетов, было проведено его совершенствование за счет дополнения методами пространственной классификации, тепловых карт, а также пространственного кластерного анализа и зонального анализа временных рядов (бинов). В результате усовершенствованный подход с аббревиатурой РАГеоД (разведочный анализ геодатасетов), стал состоять из двух частей, первая из которых, включающая методы разведочного анализа, была применена для геодатасета *ETav* в его скалярном формате (без пространственных координат), а вторая - методы анализа, примененные для этого же геодатасета *ETav* в его векторном (точечном) формате (рисунок 3.2).

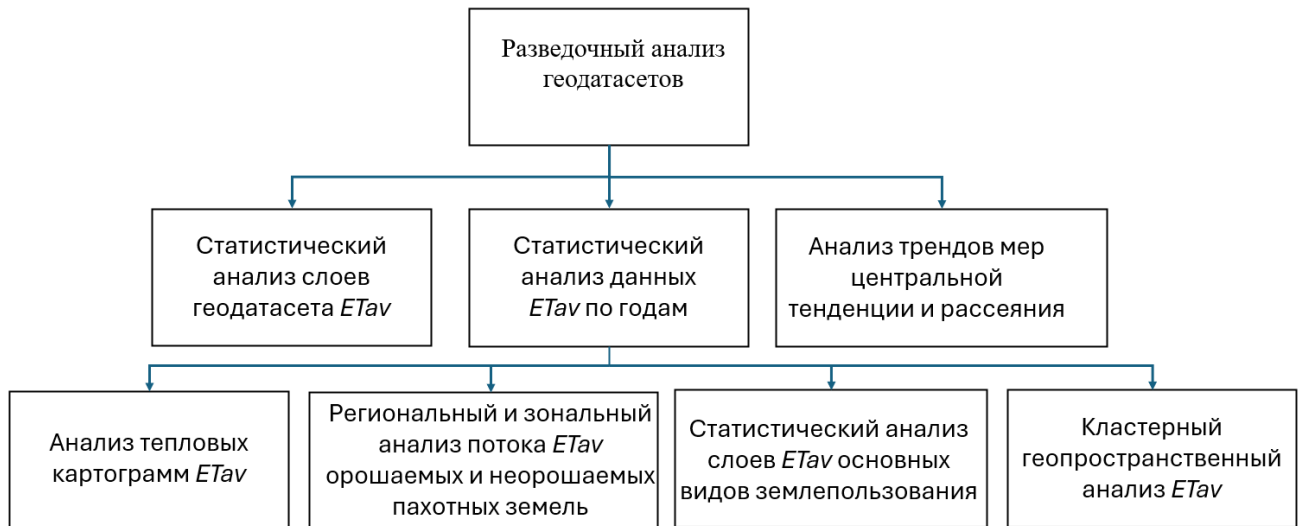


Рисунок 3.2 – Схема усовершенствованной методики РАГеоД геодатасета *ETav*

Представленная на рисунке 3.2 схема усовершенствованной методики РАГеоД геодатасета *ETav*, включает блоки, которые были использованы при пространственно-временном анализе слоев потока суммарного испарения за оросительный период.

3.3 Статистический анализ геодатасета *ETav*

В этом разделе представлены методика и результаты статистического анализа характеристик пятнадцати слоев геодатасета *ETav*, которые были получены в результате конвертации из векторного формата хранения в БГД-ТМР в скалярный формат представления. Полученные 15 отдельных датасетов представляли собой наборы скалярных данных потока *ETav*. Характеристики этих данных связаны, с одной стороны, с воздействием разнообразных природно-антропогенных процессов и их пространственной и временной изменчивостью, а с другой — с влиянием различных помех и шумов на оценки значений потоков *ETa8* продукта MOD16A2. Это послужило основанием для рассмотрения датасета *ETav* и его частей как наборов статистических данных, к которым применялись методы статистического анализа. Включенный в анализ подход предусматривал использование диаграмм рассеяния в MS Excel и макроса, составленного в среде VBA этого же ПО, для оценки соответствия функции статистического

распределения (СР) датасета, содержащего n значений переменной x_i , функции нормального распределения (НР) с использованием набора мер центральной тенденции и рассеяния (ЦТиР), который включал:

1) Среднее

$$M = \frac{\sum_i^n x_i}{n}, \quad (3.1)$$

2) Дисперсия

$$D = \frac{\sum_i^n (x_i - M)^2}{(n-1)}, \quad (3.2)$$

3) Стандартное отклонение

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - M)^2}{(n-1)}}, \quad (3.3)$$

4) Медиана

$$Me = \begin{cases} x_{\frac{(n+1)}{2}}, & \text{если } n \text{ нечетное} \\ \frac{\left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}\right)}{2}, & \text{если } n \text{ четное} \end{cases}, \quad (3.4)$$

5) Максимум

$$M_{max} = MAX(x_i), \quad (3.5)$$

6) Минимум

$$M_{min} = MIN(x_i), \quad (3.6)$$

7) Асимметрия

$$A = \frac{\sum_i^n (x_i - M)^3}{ns^3}, \quad (3.7)$$

8) Эксцесс

$$E = A = \frac{\sum_i^n (x_i - M)^3}{ns^3} - 3, \quad (3.8)$$

9) Дисперсия асимметрии

$$D(A) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}, \quad (3.9)$$

10) Дисперсия экстенета

$$D(E) = \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n-1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}, \quad (3.10)$$

- 11) Приближенный критерий оценки принадлежности к нормальной функции распределения

$$\begin{cases} |A| \leq 3\sqrt{D(A)} \\ |E| \leq 5\sqrt{D(E)} \end{cases} \quad (3.11)$$

3.3.1 Статистические характеристики геодатасета *ETav*

Визуальный анализ диаграмм рассеяния (ДР) 15 слоев геодатасета *ETav* (рисунок 3.3) свидетельствует об устойчивом характере несимметричности их форм. Наличие такой несимметричности является качественным признаком несоответствия функций статистического распределения этих датасетов функции нормального распределения. Количественное подтверждение этого было получено в результате расчетов, проведенных с использованием разработанного макроса для всех пятнадцати слоев геодатасета *ETav* (таблица Б.1 Приложение Б). Это, в свою очередь, послужило основанием для предположения о наличии влияния факторов и условий значимо отличающейся природы на формирование потоков геодатасета *ETav* (гипотеза 1).

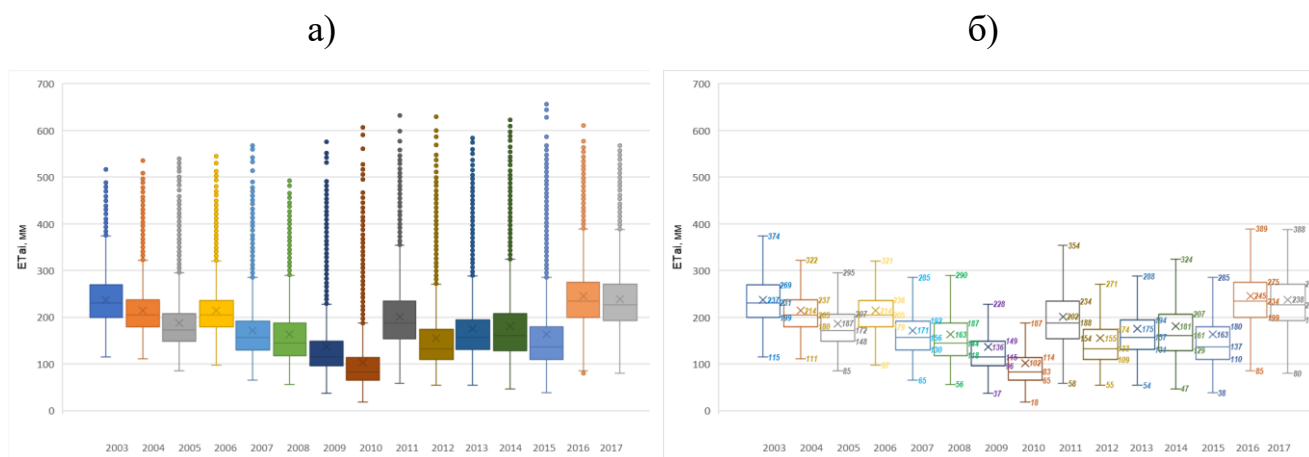


Рисунок 3.3 – Набор диаграмм рассеяния 15 слоев геодатасета *ETav*: а) с отображением выбросов; б) без отображения выбросов

3.3.2 Статистические характеристики слоев геодатасета *ETav* четырех основных видов землепользования

Для тестирования предположения о влиянии факторов и условий, значимо отличающихся по своей природе, на формирования потоков *ETa* на географическом экстенде СМ-МР, была проведена отдельная оценка статистических характеристик слоев геодатасета *ETav* четырех основных видов ЗП с наибольшими площадями (таблица 2.2): 1) «лес»; 2) «пахотные земли»; 3) «неиспользуемые земли»; 4) «другие сельскохозяйственные земли». Визуальное сопоставление соответствующих ДР (рисунок 3.4) свидетельствует о значимом отличии близких к симметричным форм функций СР, отнесенных к виду ЗП «лес», от трех остальных со значимо несимметричными формами.

Отмеченные симметричные формы функций ДР 15 слоев геодатасета *ETav* для вида «лес» нашли свое подтверждение в близких к нулю значениях асимметрии (*A*) и эксцесса (*E*) функций СР, 13 из которых (за исключением 2010 и 2017 годов) оказались соответствующими функции нормального распределения (НР) (таблица Б.2, Приложение Б), в то время как функции СР слоев геодатасета *ETav* для трех других видов землепользования в 44-х случаях (за исключением датасета «неиспользуемые земли» 2003 года) оказались несоответствующими функции НР.

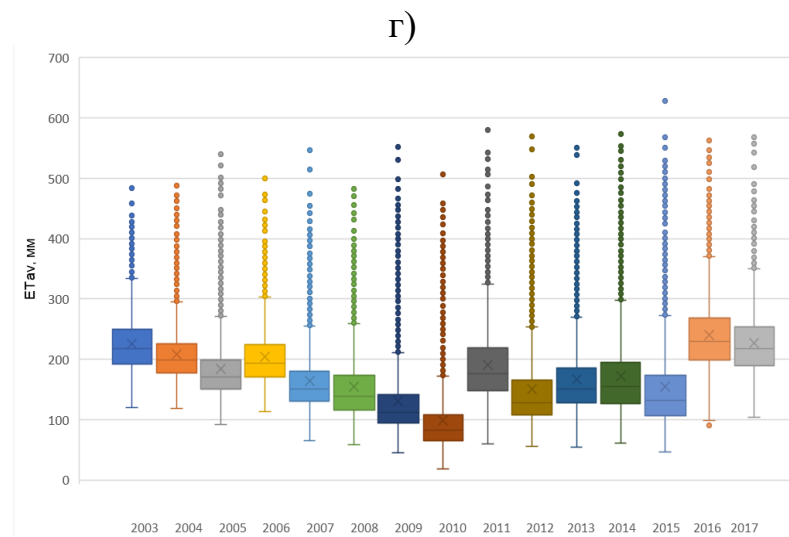
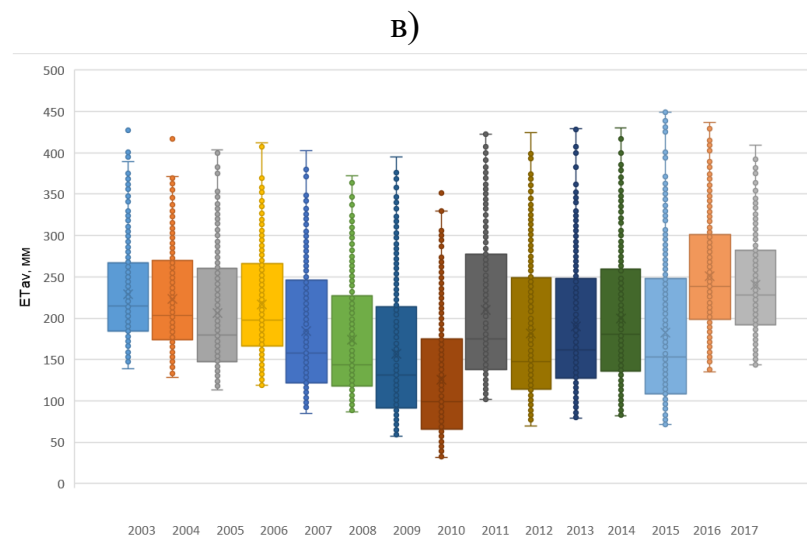
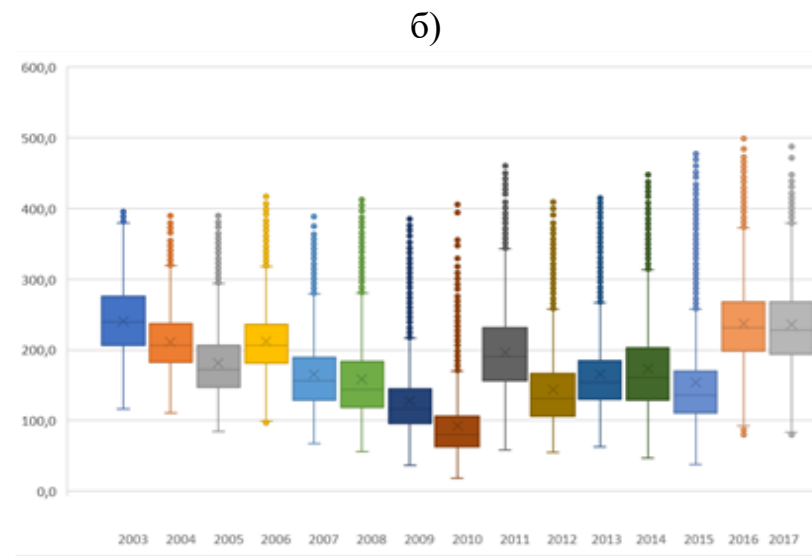
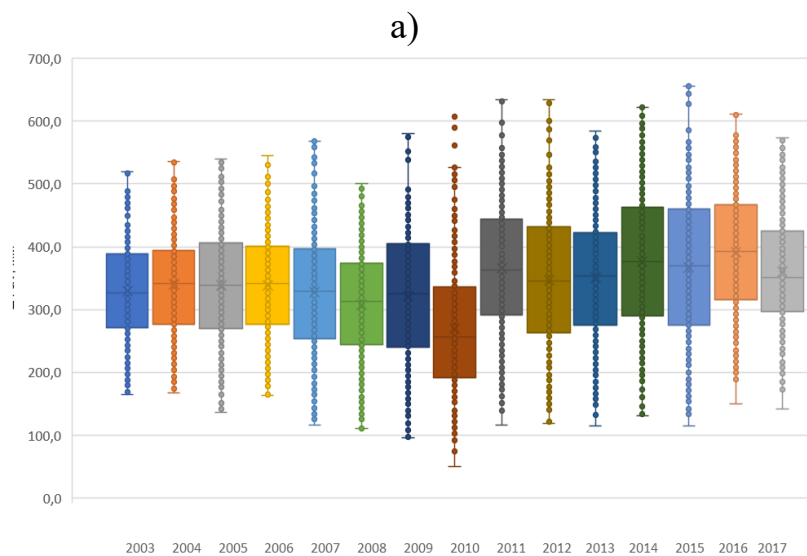


Рисунок 3.4 – Диаграммы рассеяния 15 слоев геодатасета ET_{av} (2003–2017 гг.) четырех основных видов ЗП: а) «лес»; б) «пахотные земли»; в) «неиспользуемые земли»; г) «другие сельскохозяйственные земли»

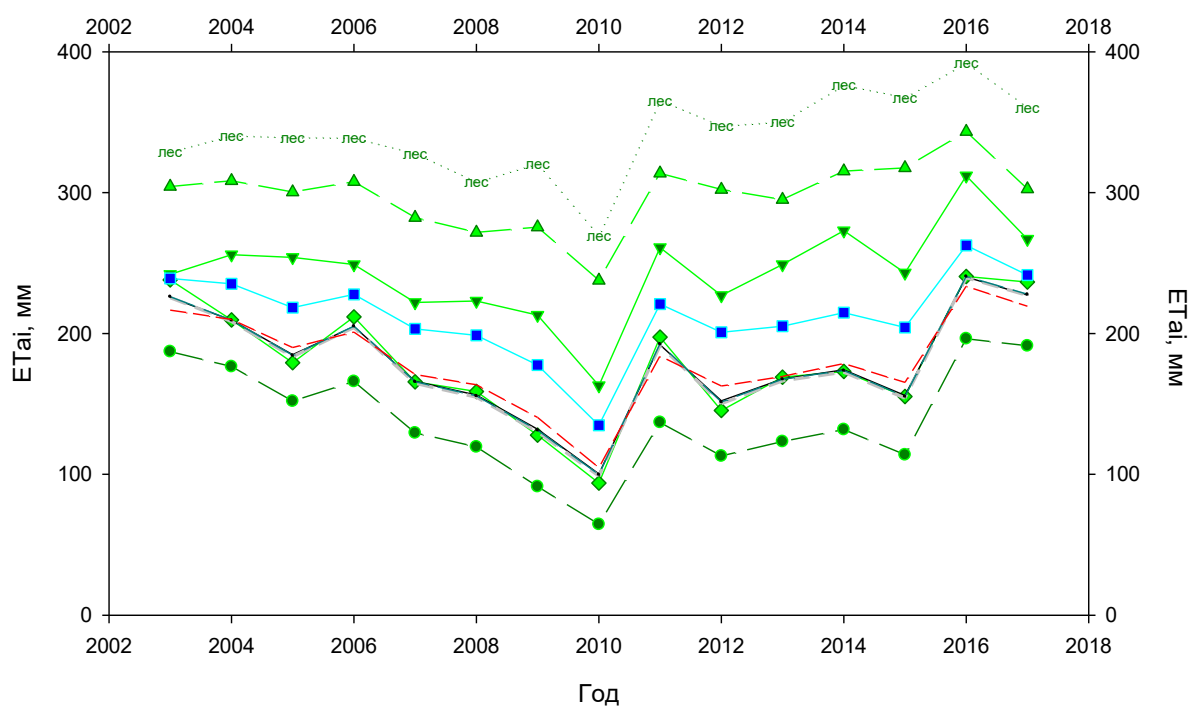
Эти результаты могут быть связаны с двумя обстоятельствами, подтверждающими правомочность гипотезы 1. Первое из них вызвано более высокой устойчивостью растительного покрова видов ЗП «лес» к временной вариабельности погодных условий из-за наличия существенно более глубокой корневой системы, позволяющей использовать запасы почвенной влаги более мощного слоя КС-ПП. Второе – со сосредоточенностью местоположений контуров ВЗ «лес» вдоль левого берега р. Волги с меньшей пространственной вариабельностью погодных характеристик в сравнении со всей территорией МР.

В то же самое время несоответствие функции ДР трех других исследованных видов ЗП, по всей видимости, вызвано, не только меньшей мощностью КС-ПП, и значимо большим распределением по всей территории МР, но и рядом других обстоятельств. Например, в случае видов ЗП «пахотные земли» дополнительное влияние могло быть вызвано изменением технологий ведения земледелия и видового состава выращиваемых сельскохозяйственных культур, а также развитием орошаемого земледелия (гипотеза 2).

3.3.3 Динамика средних мер слоев видов землепользования геодатасета *ETav*

С целью раздельного анализа динамики потоков *ETav* восьми видов ЗП за 2003–2017 гг. были сформированы временные ряды из рассчитанных средних и медианных значений (рисунок 3.5), визуальный анализ которых свидетельствует о синхронно-устойчивом изменении этих центральных мер, а также их устойчивом ранжировании.

а)



б)

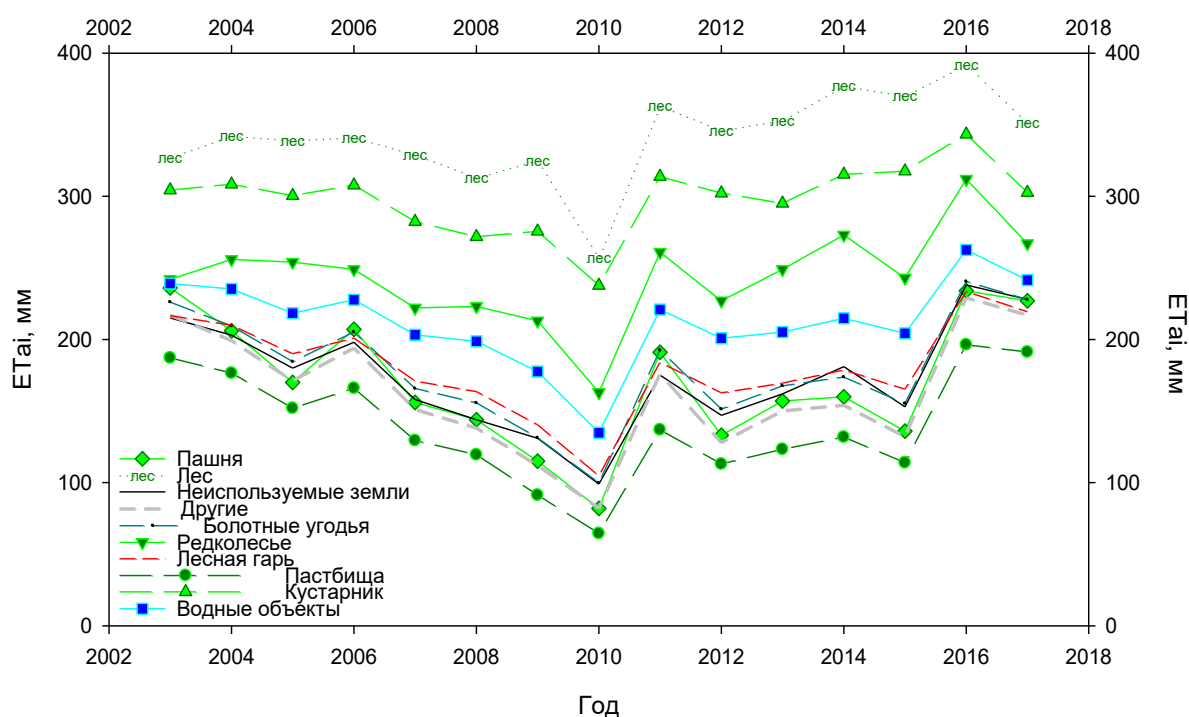


Рисунок 3.5 – Временные ряды средних (а) и медианных (б) значений 8 идентифицированных на экстенде CM-MP слоев геодатасета ET_{av}

3.3.4 Статистические характеристики трендов датасета ETav

С целью сопоставления результатов анализа трендов значений ГТК Селянинова [64] (подраздел 2.4.4) с трендами четырех основных видов ЗП геодатасета *ETav* были получены два отдельных геодатасета (пространственно-временных куба), соответствующих периодам 2003–2010 гг. и 2010–2017 гг., каждый из которых включал 19 837 временных рядов (бинов), с восемью членами (рисунок 3.6).

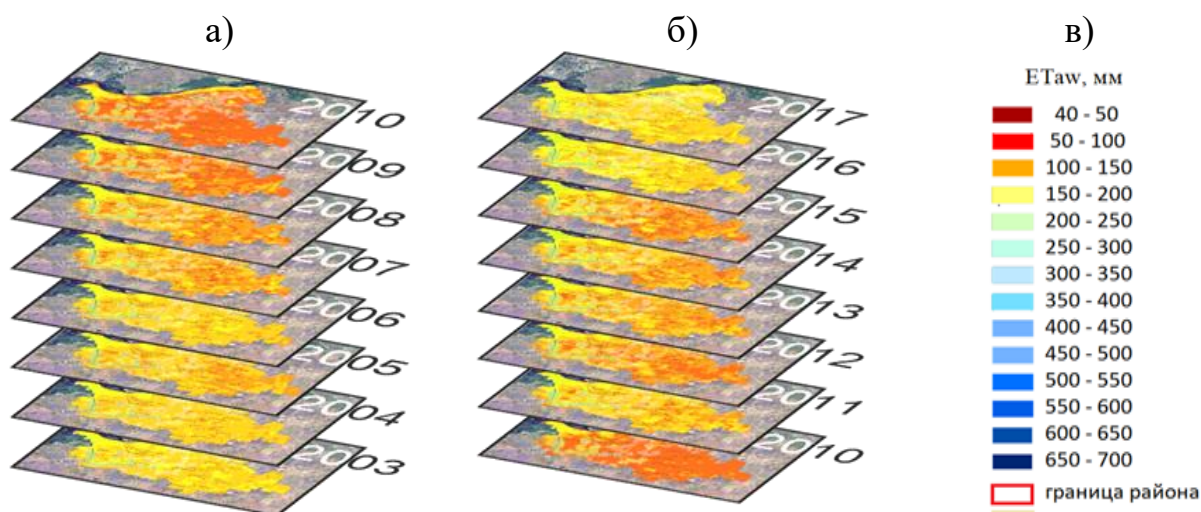


Рисунок 3.6 –Графическое представление двух частей куба геодатасета *ETav* со слоями: а) 2003–2010 гг.; б) 2010–2017 гг. и легендой (в)

Для анализа сформированных 39 674 временных рядов *ETav* в среде VBA ПО MS Excel был составлен компьютерный код, основанный на непараметрическом модифицированном тесте Манн-Кендалла [174, 199, 214]. С его помощью из дальнейших расчетов было исключено 282 ряда (0,7%), не соответствовавших критериям стационарности и монотонности. После чего для остальных 39 392 рядов, были рассчитаны параметры линейного тренда. ДР рассчитанных скоростей линейного тренда представлены на рисунке 3.7 в соответствии с их принадлежностью одному из четырех основных видов ЗП.

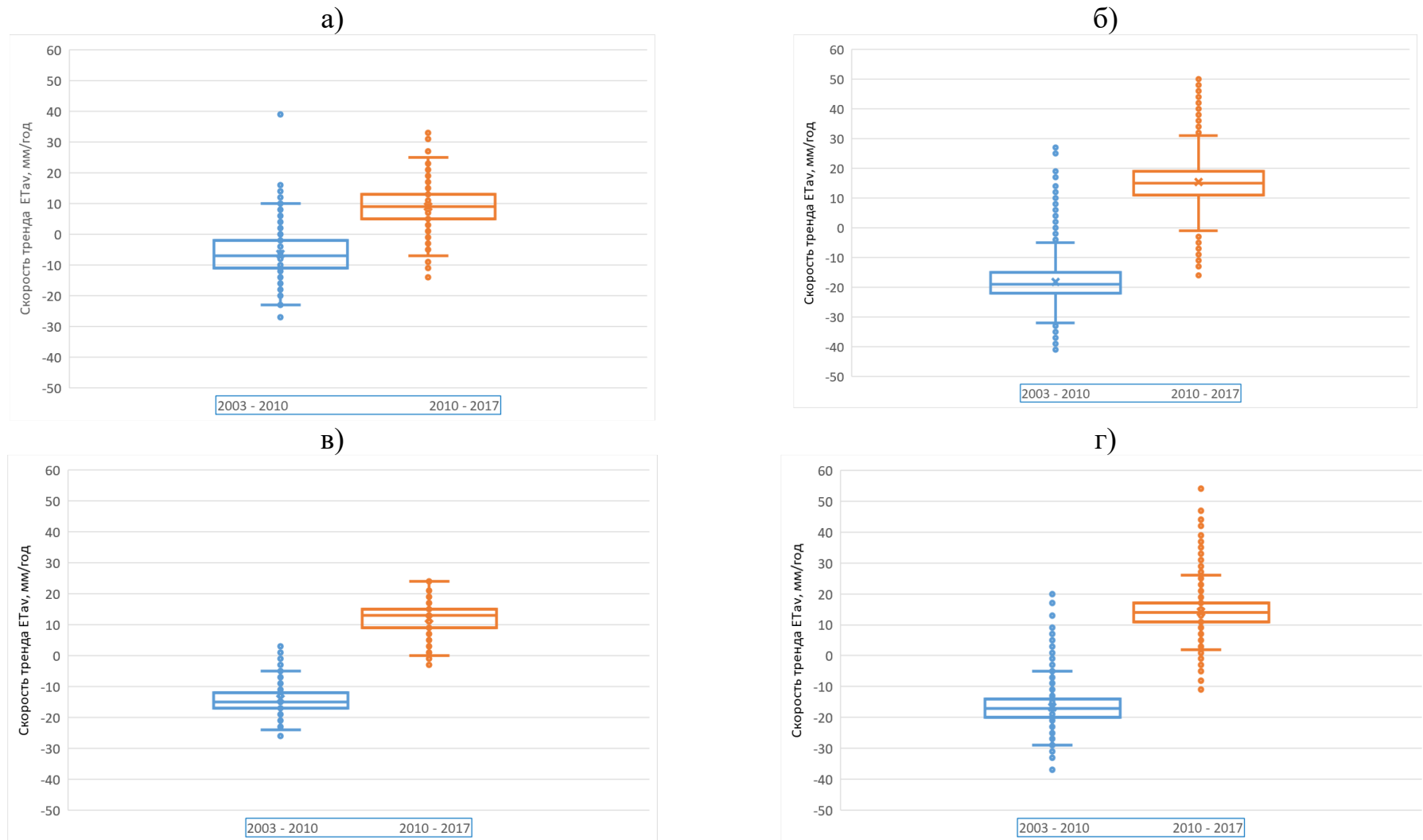


Рисунок 3.7 – Диаграммы рассеяния датасетов скоростей линейных трендов непараметрического модифицированного теста Манн-Кендалла за 2003–2010 гг. и 2010–2017 гг. четырех основных видов ЗП: а) «лес»; б) «пахотные земли»; в) «неиспользуемые земли»; г) «другие сельскохозяйственные земли»

Представленные на рисунке 3.8 диаграммы рассеяния скоростей линейных трендов датасетов *ETav* четырех видов ЗП свидетельствуют о преобладающих отрицательных значениях этого параметра в первом полупериоде (2003–2010 гг.) и его положительных значениях во втором (2010–2017 гг.). Результаты расчета мер ЦТиР обоих датасетов с использованием составленного программного кода (таблица Б.6, Приложение Б) подтвердили соответствие направленности трендов *ETav* четырех видов ЗП с направленностью трендов значений ГТК Селянинова, рассчитанных по данным метеостанции г. Ершова.

3.4. Геостатистический анализ геодатасета *ETav*

В результате статистического анализа геодатасета *ETav* (раздел 3.3) было высказано предположение о возможном влиянии пространственного распределения основных видов ЗП по территории СМ-МР на полученные результаты. Для его тестирования, методика и результаты которого приведены ниже, были использованы геопространственные статистические (геостатистические) тесты, направленные на идентификацию геопространственных кластеров геодатасета *ETav*. Эти геостатистические тесты, впрочем, как и другие статистические тесты, основаны на подтверждении или отбрасывания т. н. нулевой гипотезы, о наличии пространственных связей между отдельными инцидентами (записями) с использованием оценки автокорреляции на заданных расстояниях (лагах). Применительно к слоям геодатасета *ETav* подтверждение нулевой гипотезы означает отсутствие каких-либо статистически значимых пространственных связей между отдельными инцидентами, что означает хаотичное распределение соответствующих потоков на географическом экстенде СМ-МР. Противоположный же результат, заключающийся в отбрасывании нулевой гипотезы, свидетельствует о неслучайном характере взаимного расположения соседних инцидентов, местоположения которых связаны между

собой, что находит свое отражение в формировании т.н. геостатистических кластеров.

3.4.1. Геостатистические характеристики кластеров геодатасета *ETav*

С целью идентификации местоположений зависимых между собой записей геодатасета *ETav* был проведен геостатистический кластерный анализ его 15 слоев. Для его реализации был использован инструмент Optimized Hot Spot Analysis (Оптимизированный анализ горячих точек) ПО ArcGIS Pro 2.8, основанный на метриках локального индекса Морана [189, 199]. Этот инструмент предназначен для идентификации четырех типов геопространственных кластеров (геокластеров): 1) «High-High» (высокий-высокий), когда инциденты с высокими значениями окружены инцидентами с высокими значениями; 2) «Low-Low» (низкий-низкий), когда инциденты с низкими значениями окружены инцидентами с низкими значениями; 3) «High-Low» (высокий-низкий), когда инциденты с высокими значениями окружены инцидентами с низкими значениями; 4) «Low-High» (низкий-высокий), когда инциденты с низкими значениями окружены инцидентами с высокими значениями.

На рисунке 3.8 представлены наборы пар 15 картограмм (2003-2017 гг.): 1) (слева) метрики локального индекса Морана рассчитанные с доверительной вероятностью 99 %; 2) (справа) слои геодатасета *ETav*, поверх которых отображены соответствующие слои ОГ.2 идентифицированных ДМ-КМ (подраздел 2.3.2). При визуальном сопоставлении геокластеров, идентифицированных на 15 слоях геодатасета *ETav*, с картограммами этих же слоев, отображающих потоки *ETav* (рисунок 3.8), обращают на себя внимание три таких геокластера, соответствующие hot/cold spot (горячая/холодная точка), имеющих наибольшие размеры. Первый из них включает геокластеры, расположенные в прибрежной полосе р. Волги, очертания которых в течение всего исследуемого периода 2003–2017 гг. в целом достаточно стабильны и совпадают с контурами вида ЗП «лес», а также изоплетами коэффициента ГТК Селянинова

(рисунок 2.3в). При этом в ряде лет к этим геокластерам, расположенным на его северной части, добавляются геокластеры, расположенные на расстоянии 5–10 км в юго-восточном направлении. Одно из возможных объяснений такого эпизодического появления/исчезновения этих контуров может быть связано со значимым отличием норм весенне-летних осадков в соответствующих им местоположениях.

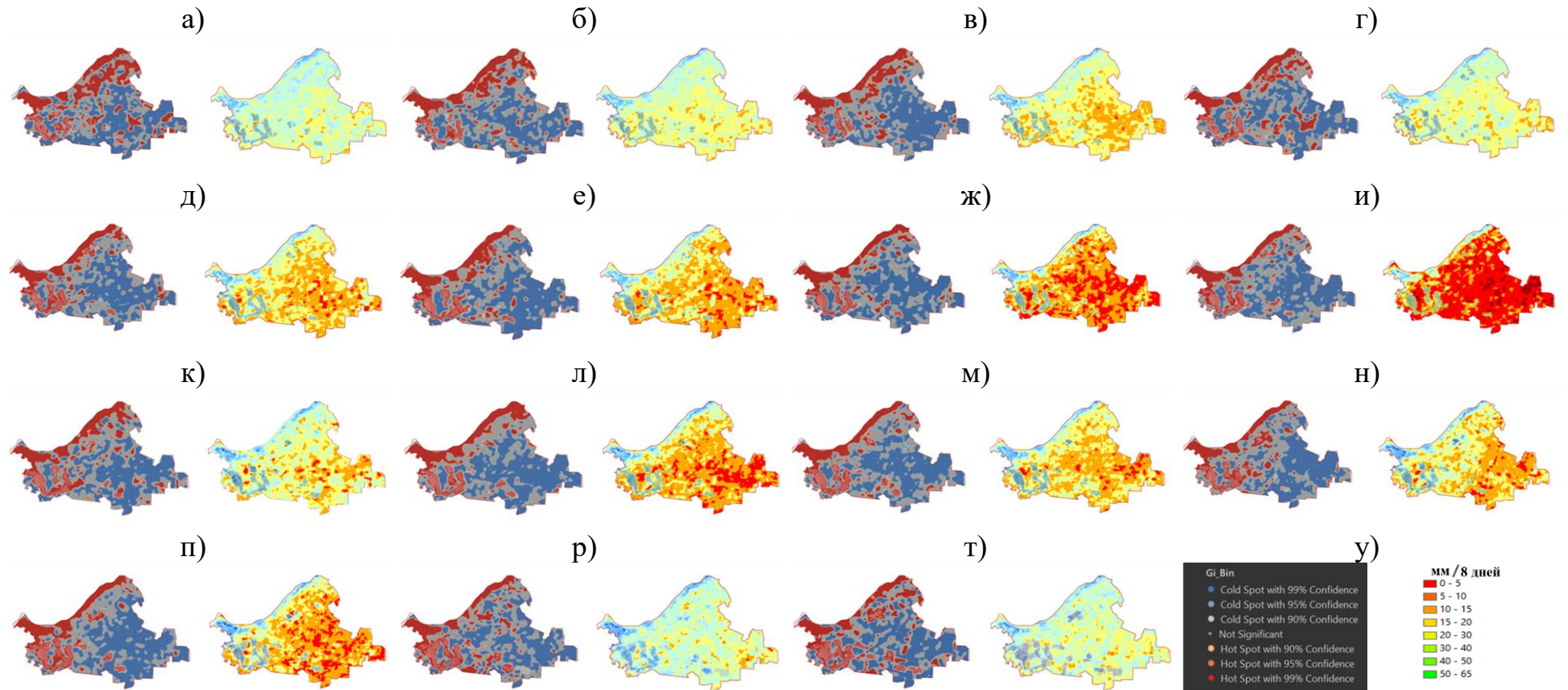


Рисунок 3.8 – Картограммы слоев метрик локального индекса Морана и потоков $ETav$: а) 2003 г.; б) 2004 г.; в) 2005 г.; г) 2006 г.; д) 2007 г.; е) 2008 г.; ж) 2009 г.; и) 2010 г.; к) 2011 г.; л) 2012 г.; м) 2013 г.; н) 2014 г.; п) 2015 г.; р) 2016 г.; т) 2017 г.; а также соответствующих легенд (у)

Второй из трех отмеченных выше геокластеров сформирован в виде контуров, имеющих сложное, изменяющееся во времени очертание границ, которые на картограмме 2016 г. напоминают четырехугольник. Две стороны этого четырехугольника (юго-западная и юго-восточная) расположены по обе стороны магистрального канала 1-й очереди ПОС, а две другие (северо-восточная и северо-западная) расположены, соответственно, вдоль внутрихозяйственной водораспределительной сети, а также автомагистрали Саратов — Самара. Интересно отметить, что в первые годы исследуемого периода 2003–2017 гг., контуры этого геокластера менялись незначительно вплоть до 2014 г., после чего они стали претерпевать более значимое изменение за счет добавления новых инцидентов, появление которых совпадает с появлением дополнительных контуров идентифицированных ДМ-КД. Отмеченное может свидетельствовать о наличии пространственно-временных связей между слоями геодатасета *ETav* и слоями ДМ-КД, формирующих его внутреннюю структуру. Количественное подтверждение этого предположения, соответствующего гипотезе 2, на примере анализа развития и модернизации инфраструктуры ОС приведены в главе 4.

Третий из отмеченных трех геокластеров, контуры которого в отдельные годы расположены в юго-восточной части, а северо-западная в отдельные годы (2003–2009, 2012, 2015) напоминают очертание левого берега р. Волги и располагаются на удалении от него на расстояние порядка 20–30 км. Это обстоятельство послужило основой для предположения о наличии зональности в пространственном распределении потоков *ETa* по мере удаленности от левого берега р. Волги. Количественное подтверждение этого предположения, также соответствующего гипотезе 2, на примере результатов регионального и зонального варьирования характеристик геодатасета *ETa* приведены в главе 4.

3.4.2. Геоestatистические характеристики трендов геодатасета *ETav*

Несмотря на выявление трех значимых геокластеров геодатасета *ETav*, визуальная идентификация других была осложнена высокой пространственной

дифференциацией метрик локального индекса Морана слоев *ETav*. В связи с этим для слоев геодатасетов скоростей линейных трендов двух полупериодов (2003–2010 гг. и 2010–2017 гг.) были рассчитаны метрики локального индекса Морана. Картографическое отображение слоев медианных значений этих полупериодов в среде ArcGIS Pro 2.8 с использованием единой цветовой палитры представлено на рисунке 3.9.

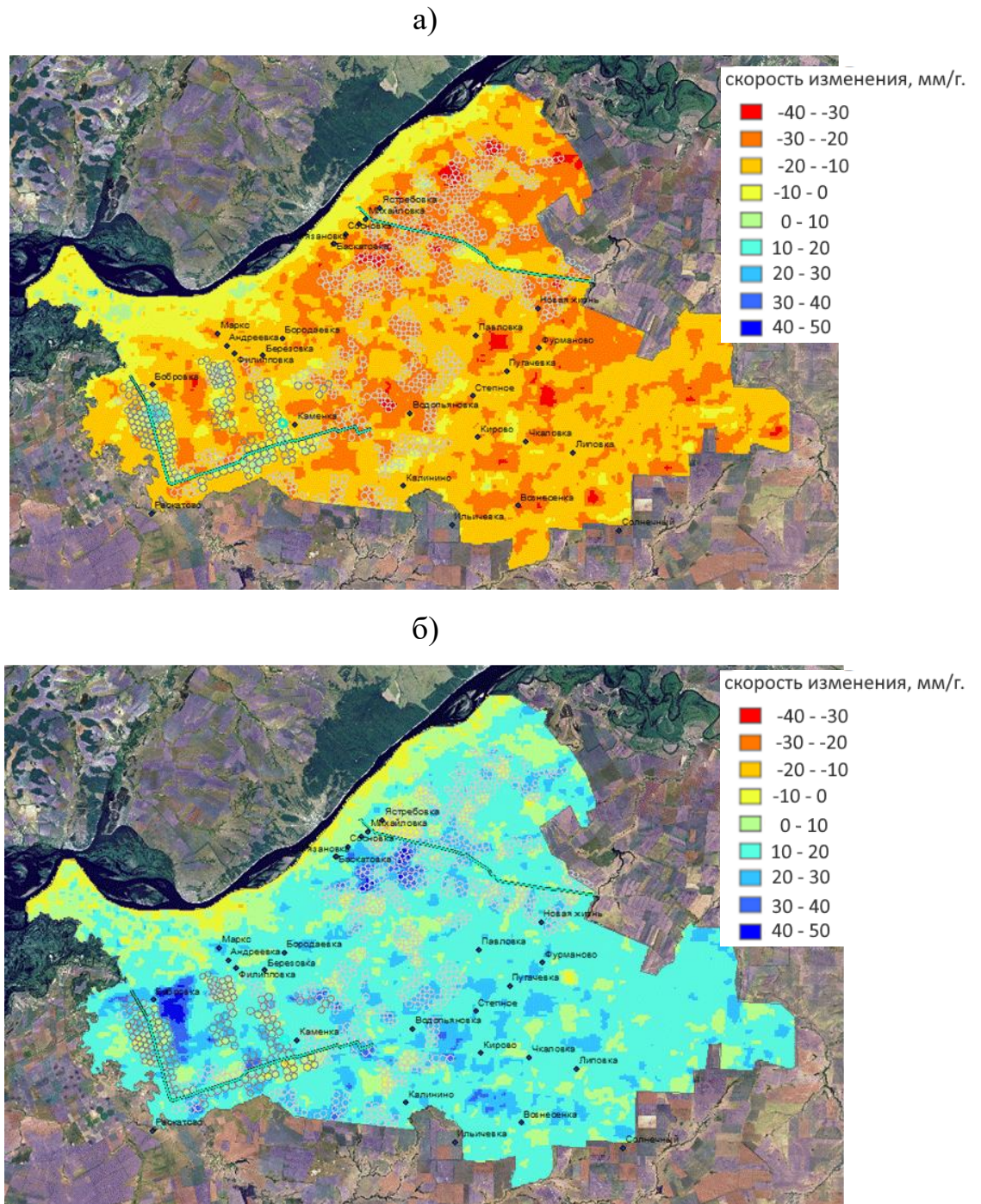


Рисунок 3.9 – Картограммы медианных значений скоростей линейных трендов двух полупериодов геодатасета *ETav*: а) 2003–2010 гг.; б) 2010–2017 гг.

Картографическое отображение слоев медианных значений скоростей линейных трендов первого полупериода (2003–2010 гг.) геодатасета *ETav* (рисунок 3.9 а) характеризуется доминирующими отрицательными значениями, объединенными в ряд пространственных геокластеров. Так, в прибрежной полосе левого берега р. Волги с видом ЗП «лес» преобладают контуры кластеров со скоростями линейных трендов, варьирующими в пределах от 0 до -10 мм/год. В то же время в центральной и восточной частях значения этих скоростей лежат в пределах от -20 до -30 мм/год. Во втором полупериоде, который характеризуется доминирующими положительными скоростями трендов (рисунок 3.9 б), наблюдается внешне схожее расположение паттернов, но уже с положительными значениями. В центральной части эти скорости лежат в пределах от 10 до 20 мм/год, в то время как в прибрежной полосе р. Волги и восточной части располагаются геопространственные кластеры с близкими к нулю или даже отрицательными значениями скоростей трендов.

На двух картограммах, представленных на рисунке 3.9, обращают на себя внимание паттерны с инцидентами, имевшими в первый полупериод существенно меньшие скорости тренда по сравнению с доминирующими. Один из таких паттернов располагается вдоль берега р. Волги в пределах контуров, соответствующих виду ЗП «лес». Ряд аналогичных паттернов расположен в зоне действия водоподающей инфраструктуры первой очереди канала ПОС.

На медианных значениях скоростей линейных трендов второго полупериода (2010–2017 гг.) геодатасета *ETav* (рисунок 3.9 б), помимо тех же геокластеров, расположенных вдоль берега р. Волги, значимо выделяется ряд других, со значительно более высокими положительными значениями скоростей. Один из них расположен северо-восточнее первой очереди канала ПОС, его местоположение связано с появлением дополнительных ДМ-КД, повлекших за собой увеличение потоков *ETa*.

3.4.3. Зональный анализ потоков ET_{av} вида землепользования «пахотные земли»

Для зонального анализа пространственного распределения характеристик геодатасета ET_{av} по территории СМ-МР, занимаемой пахотными землями в зонах разной удаленности от уреза левого берега р. Волги, были использованы маски слоев видов ЗП (раздел 2.3.3) и границ этих зон (БГ-7, раздел 2.3.4). В результате для каждой из семи выделенных зон было сформировано 15 датасетов ET_{av} , по данным которых были рассчитаны соответствующие зональные характеристики ЦТиР «пахотных земель». Набор временных рядов медианных значений ET_{av} , соответствующих территориям «пахотных земель» семи зон разной удаленности от уреза левого берега р. Волги, представлен на рисунке 3.10.

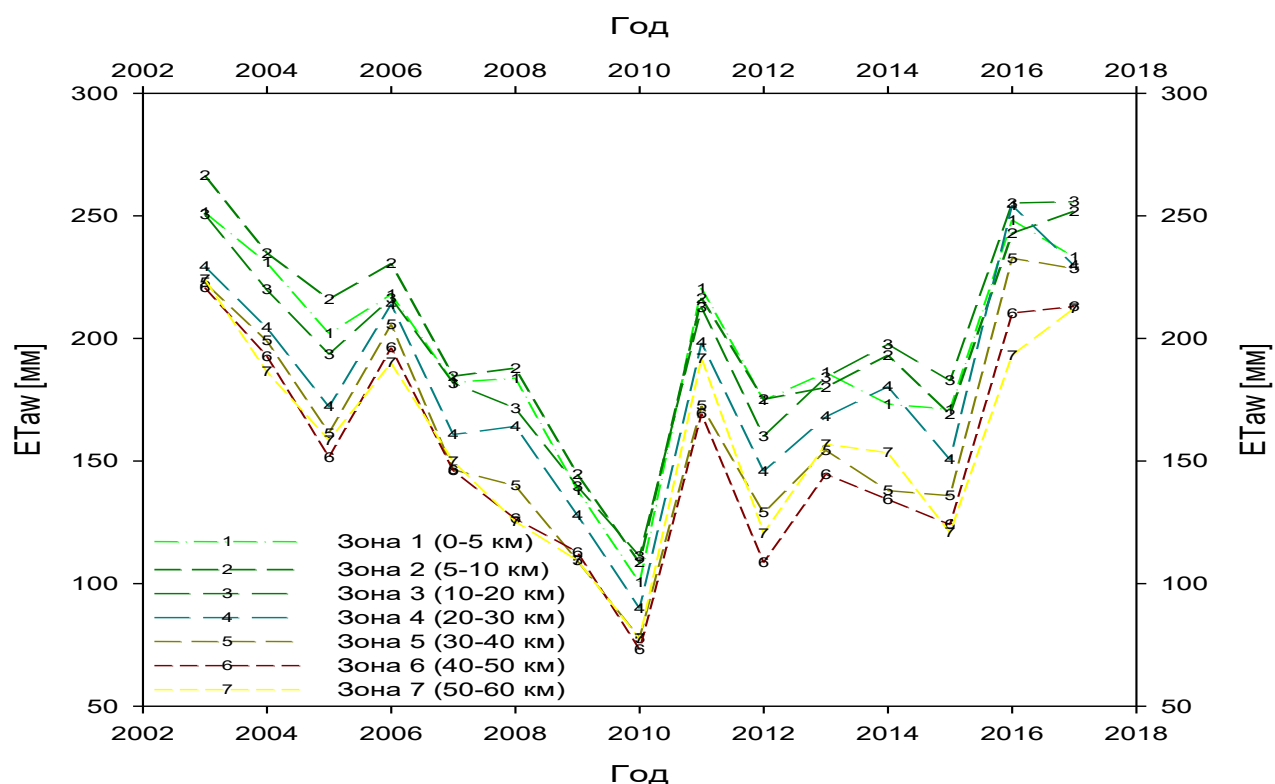


Рисунок 3.10– Временные ряды медианных значений потока ET_{av} «пахотных земель» 7 зон разной удаленности от уреза левого берега р. Волги (2003–2017 гг.)

Визуальный анализ представленных на рисунке 3.10 временных рядов медианных значений ET_{av} «пахотных земель» свидетельствуют о наличии достаточно устойчивой синхронной динамики уменьшения соответствующих

значений по мере удаления от уреза левого берега р. Волги в каждый год исследуемого временного интервала 2003–2017 гг. [19]. При этом было отмечено, что выявленный порядок ранжирования медианных значений $ETav$ «пахотных земель» в целом соответствовал виду хроноизоплет ГТК Селянинова, представленных выше на рисунке 2.3 в [16].

Для более детального анализа синхронности ранжирования чередования медианных значений $ETav$ (рисунок 3.10) были выделены две группы: первая из них включала временные ряды зон 1–4, а вторая – временные ряды зон 5–7. Такая дифференциация была основана на сложившемся, устойчивом во времени порядке ранжирования временных рядов медианных значений $ETav$ второй группы, который соответствовал их порядковым номерам. Аналогичное ранжирование соблюдалось и у временных рядов медианных значений $ETav$ первой группы вплоть до 2012 года, после чего порядок чередования изменился и оставался достаточно устойчивым вплоть до конца исследованного периода 2003–2017 гг.

Выводы по третьей главе:

1. Для оценки пространственно-временных региональных и зональных характеристик потока $ETav$ за исследуемый период 2003–2017 гг. было проведено совершенствование методики разведочного анализа геоданных (РАГеоД). Научная новизна этой методики заключается в ее применении для наборов геоданных, сформированных в результате разметки геодатасета данного потока с использованием основных и дополнительных слоев базы геоданных СМ-МР.

2. Региональный и зональный анализ полученных с использованием разработанной методики наборов мер центральной тенденции и разброса слоев $ETav$ созданной базы геоданных СМ-МР позволил сделать вывод о воздействии факторов и условий различной природы на формирование пространственно-временных характеристик этих слоев. Основные из них характеризовались трендами погодных условий и региональным распределением видов землепользования, а также их зональностью по мере удаления от уреза левого берега р. Волги.

3. Результаты проведенного в рамках разработанной методики (РАГеоД) геостатистического кластерного анализа слоев *ETav* базы геоданных СМ-МР за исследуемый период 2003–2017 гг. позволили выявить местоположения контуров с высокими значениями этого потока, границы которых визуальнo совпадали с идентифицированными по данным космического мониторинга местоположениями контуров полей, орошение которых осуществлялось с помощью дождевальнх машин кругового действия.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ И ЗОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ET_{av} ОРОШАЕМЫХ И НЕОРОШАЕМЫХ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ТЕРРИТОРИИ МАРКСОВСКОГО РАЙОНА

На предшествующих этапах настоящего диссертационного исследования были созданы слои ET_{av} , соответствующие оросительным периодам исследованного интервала 2013–2017 гг. (подраздел 2.3.1). Применение инструментов зонального анализа в ПО ArcGIS Pro 2.8 для анализа видов землепользования (ISRIC) (подраздел 2.3.3) слоев ДМ-КД (подраздел 2.3.2) позволило показать, что соответствующие им контура относятся к виду ЗП «пахотные земли» (подраздел 2.3.3), а из них сформированы кластеры с высокими значениями потока ET_{av} . Эти результаты создали основу для решения задачи 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 Марксовского района Саратовской области в 2003–2017 гг., а также оценить влияние внешних драйверов на полученные результаты».

В разделе 4.1 приведена разработанная методика классификации геодатасета ET_{av} на принадлежность двум дополнительным подвидам землепользования – «орошаемые пахотные земли» (ОПЗ) и «неорошаемые пахотные земли» (НПЗ), а также описание полученных результатов их анализа.

В разделе 4.2 приведены результаты анализа зонального анализа характеристик потоков ET_{av} , а также результаты и анализ применения усовершенствованной методики РАГеоД для оценки региональных характеристик суммарного испарения орошаемых и неорошаемых пахотных земель.

4.1. Региональный анализ характеристик потоков ET_{av} орошаемых и неорошаемых пахотных земель

Выше в Главе 3 в результате проведенного РАГеоД анализа геодатасета ET_{av} были получены количественные характеристики пространственно-временной динамики потоков ET_a на землях, занимаемых четырьмя основными типами ЗП. При этом было высказано предположение о влиянии на эту динамику изменений в технологиях ведения пропашного земледелия, включая орошаемое. Для его проверки с помощью слоев ДМ-КД была проведена дополнительная разметка записей геодатасета ET_{av} , относящихся к виду ЗП «пахотные земли» на два подвида: 1) «орошаемые пахотные земли»; 2) «неорошаемые пахотные земли». Методика этой разметки, а также полученные при этом результаты приведены ниже.

4.1.1. Методика разметки геодатасета ET_{av} на соответствие орошаемым и неорошаемым пахотным землям

С целью разметки слоев геодатасета ET_{av} , соответствующих виду ЗП «пахотные земли», на их принадлежность одному из двух подвидов: 1) «орошаемые пахотные земли» (ОПЗ); 2) «неорошаемые пахотные земли» (НПЗ) в ПО ArcGIS Pro 2.8 был разработан специальный компьютерный код для реализации требуемой классификации. Соответствующий алгоритм был основан на двух допущениях. Первое допущение заключалось в возможности полного или частичного попадания i -го пикселя j -го года $ET_{av_{j,i}}$ внутрь k -го контура ДМ-КД того же j -го года. Второе - допускало полное или частичное попадание девяти примыкающих друг к другу пикселей геодатасета ET_{av} внутрь k -го контура ДМ-КД. Это позволяло гарантированно покрывать ими внутренне пространство контура ДМ-КД с максимальным идентифицированным диаметром, составившим 1200 м.

Реализованный с использованием этих допущений код заключался в последовательном геометрическом анализе попадания пикселя $ETav_{j,i}$ внутрь одного или нескольких контуров ДМ-КД этого же j -го года. При положительном результате производился расчет площади i -го пикселя, попавшей внутрь k -го контура ДМ-КД j -го года ($S_{j,i}^k$). Полученный при этом результат и идентификатор i -го пикселя присваивались соответствующим атрибутам k -го геобъекта контура ДМ-КД j -го года. В тоже самое время для оценки вклада потока $ETav_{j,i}$ в поток k -го контура ДМ-КД j -го года ($ETav_{j,k}^{DM-KD}$) было установлено значение соответствующего порога по части площади i -го пикселя, попавшей внутрь k -го контура, равное 70%, которое было получено эмпирически при сопоставлении результатов наземного мониторинга и данных ДЗЗ при проведении полевых исследований 2006–2009 гг. (раздел 2.6). При превышении этого порога атрибутам соответствующего точечного геобъекта $ETav_{j,i}$ присваивалось значение $Ir_{j,i}^k = 1$, указывающее на его соответствие подвиду ЗП «орошаемые пахотные земли», а в противоположном случае - значение $Ir_{j,i}^k = 0$, указывающее на его соответствие подвиду ЗП «неорошаемые пахотные земли».

Полученные с использованием описанной классификации результаты были использованы для расчета членов временных рядов потока $ETav_{j,k}^{DM-KD}$ по следующему выражению

$$ETav_{j,k}^{DM-KD} = \frac{\sum_{i=1}^{i=9} ETav_{j,i} \cdot S_{j,i}^k \cdot Ir_{j,i}^k}{\sum_k^K S_{j,i}^k \cdot Ir_{j,i}^k}, \quad (4.1)$$

В результате расчетов по выражению (4.1) были получены временные ряды для общей сложности 404 контуров ДМ-КД, идентифицированных за период 2003–2017 гг. [21, 22]. Анализ этих рядов позволил выявить случаи, когда орошение контуров ряда ДМ-КД по разным причинам не было реализовано, наиболее распространенные среди отмеченных случаев были связаны с заменой и ремонтом ДМ-КД, а также разного рода нештатными ситуациями на боковых насосных станциях КОС и ПОС и водоподающих трубопроводах. Ряд таких случаев был

зафиксирован при проведения полевых исследований 2006–2009 гг. на территории КОС и послужил для тестирования разработанной методики.

4.1.2. Разведочный анализ поднаборов геоданных потоков ET_{av} орошаемых и неорошаемых пахотных земель

На первом этапе анализа геодатасета ET_{av} , размеченного на принадлежность подвидам «орошаемые пахотные земли» и «неорошаемые пахотные земли» (соответственно ET_{av}^{OPZ} и ET_{av}^{HPIZ}) были использованы процедуры статистического анализа усовершенствованного РАГеоД для оценок мер ЦТиР поднаборов данных, представлены на рисунке 4.1 в виде диаграмм рассеяния.

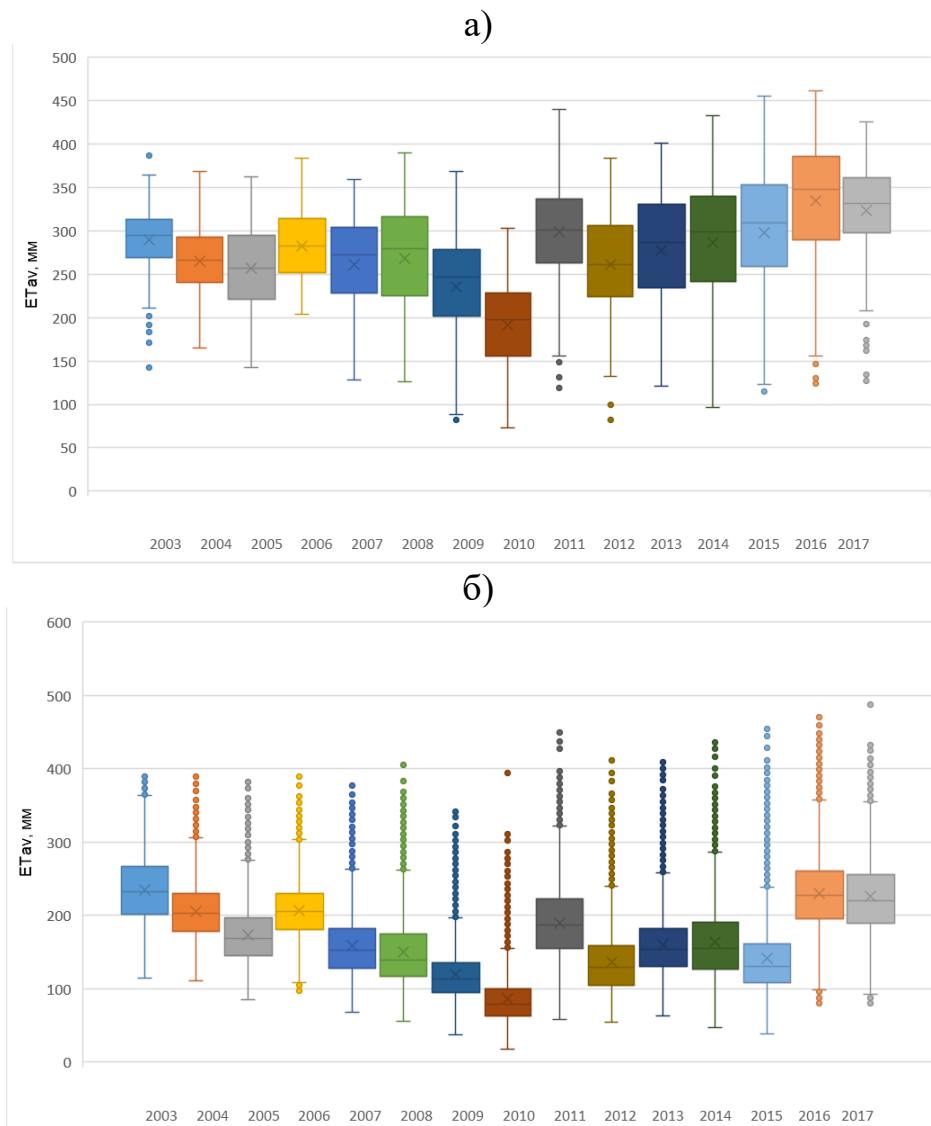


Рисунок 4.1 – Диаграммы рассеяния потоков ET_{av} подвидов ЗП: а) «орошаемые пахотные земли»; б) «неорошаемые пахотные земли»

Визуальный анализ представленных на рисунке 4.1 диаграмм рассеяния свидетельствует о значительно более высоких значениях мер центральной тенденции датасетов $ETav^{ОПЗ}$ при их сопоставлении с аналогичными датасетами $ETav^{НПЗ}$ одних и тех же лет. При этом обращает на себя внимание различный характер выбросов у обоих датасетов. Так для слоев датасета $ETav^{ОПЗ}$, соответствующих 2003, 2009, 2011, 2012, 2016 и 2017 годам имеет место наличие одиночных выбросов ниже 1-го квартиля. А поскольку, значения этих выбросов сопоставимы со значениями слоев датасетов $ETav^{НПЗ}$ между первым и третьим квартилями, то отмеченные выбросы могут соответствовать случаям, когда орошение в соответствующих местоположениях контуров ДМ-КД, или частично, или полностью не проводилось, что нашло свое подтверждение полевыми наблюдениями 2009 г. По-видимому, для идентификации таких случаев в будущем потребуются дополнительные данные ДЗЗ более высокого разрешения.

В свою очередь значения выбросов потоков $ETav^{НПЗ}$, которые за исключением 2016 и 2017 годов (два выброса ниже 1-го квартиля), находятся в диапазоне выше 3-го квартиля, сопоставимы со значениями потоков $ETav^{ОПЗ}$ этих же лет между 1 и 3 квартилями. Это, может указывать на наличие в соответствующих местоположениях контуров ДМ-КД иного вида землепользования, который не соответствует подвиду «неорошаемые пахотные земли». Одними из них могут являться контура, орошение которых осуществлялось, или с помощью фронтальных ДМ, или посредством иных технологий, как например орошение по бороздам, которое зачастую использовалось в эти года арендаторами для выращивания овощных культур, на полях, находящихся вблизи водотранспортирующей инфраструктуры ПОС и КОС (подраздел 3.4.3).

Расчеты статистических характеристик мер центральной тенденции и разброса датасетов обоих подвидов ОПЗ и НПЗ были получены с использованием разработанного макроса (раздел 3.3). Полученные при этом значения (Таблица Г.1, Приложение Г) подтвердили отмеченный симметричный характер датасетов $ETav^{ОПЗ}$ семи лет - 2004–2006 гг., 2009–2010 гг., а также 2012 г. и 2016 г., и их

соответствие функции нормального распределения (3.12), в то время как датасеты $ETav^{HПЗ}$ всех 15 лет были классифицированы, как не соответствующие функции нормального распределения.

С целью оценки влияния отмеченных выше выбросов обоих датасетов $ETav^{ОПЗ}$ и $ETav^{HПЗ}$ на значения рассчитанных мер центральной тенденции был проведен дополнительный анализ. Для этого из слоев датасета $ETav^{ОПЗ}$ исключены записи, значения которых не превышали соответствующие значения 1-го квартиля, доля которых составляла 0,045–0,12%. В свою очередь из слоев датасета $ETav^{HПЗ}$ были исключены значения, превышавшие 3-й квартиль, доля которых составила 0,013–0,036%. Проведенное затем сопоставление рассчитанных для отфильтрованных датасетов значений центральных мер с аналогичными значениями неотфильтрованных, показало их незначительные отличия.

4.1.3. Оценка региональных характеристик потока $ETav$ орошаемых и неорошаемых пахотных земель

Для оценки региональных характеристик потока $ETav$ орошаемых и неорошаемых пахотных земель был использован геодатасет $ETav^{ОПЗ}$, полученный в результате разметки геодатасета $ETav$ (раздел 4.1.1) На первом шаге по следующим выражениям j -го года были рассчитаны объемы суммарного испарения $vETav_j^{ОПЗ}$ за оросительный период j -го года, а также соответствующие площади ведения орошения на пахотных землях $S_j^{ОПЗ}$

$$vETav_j^{ОПЗ} = \sum_k^{K_j} ETav_{j,k}^{ДМ-КД}, \quad (4.2)$$

$$S_j^{ОПЗ} = \sum_k^{K_j} S_{j,i}^k \cdot Ir_{j,i,j,i}^k, \quad (4.3)$$

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

Результаты проведенных расчетов в виде диаграмм соответствующих временных рядов временных $vETav_j^{ОПЗ}$ и $S_j^{ОПЗ}$, представленные на рисунке 4.2, иллюстрируют отмеченное выше влияние изменения инфраструктуры

оросительных систем, расположенных на территории Марковского района, а также флуктуации погодных условий 2003–2015 гг. [244]

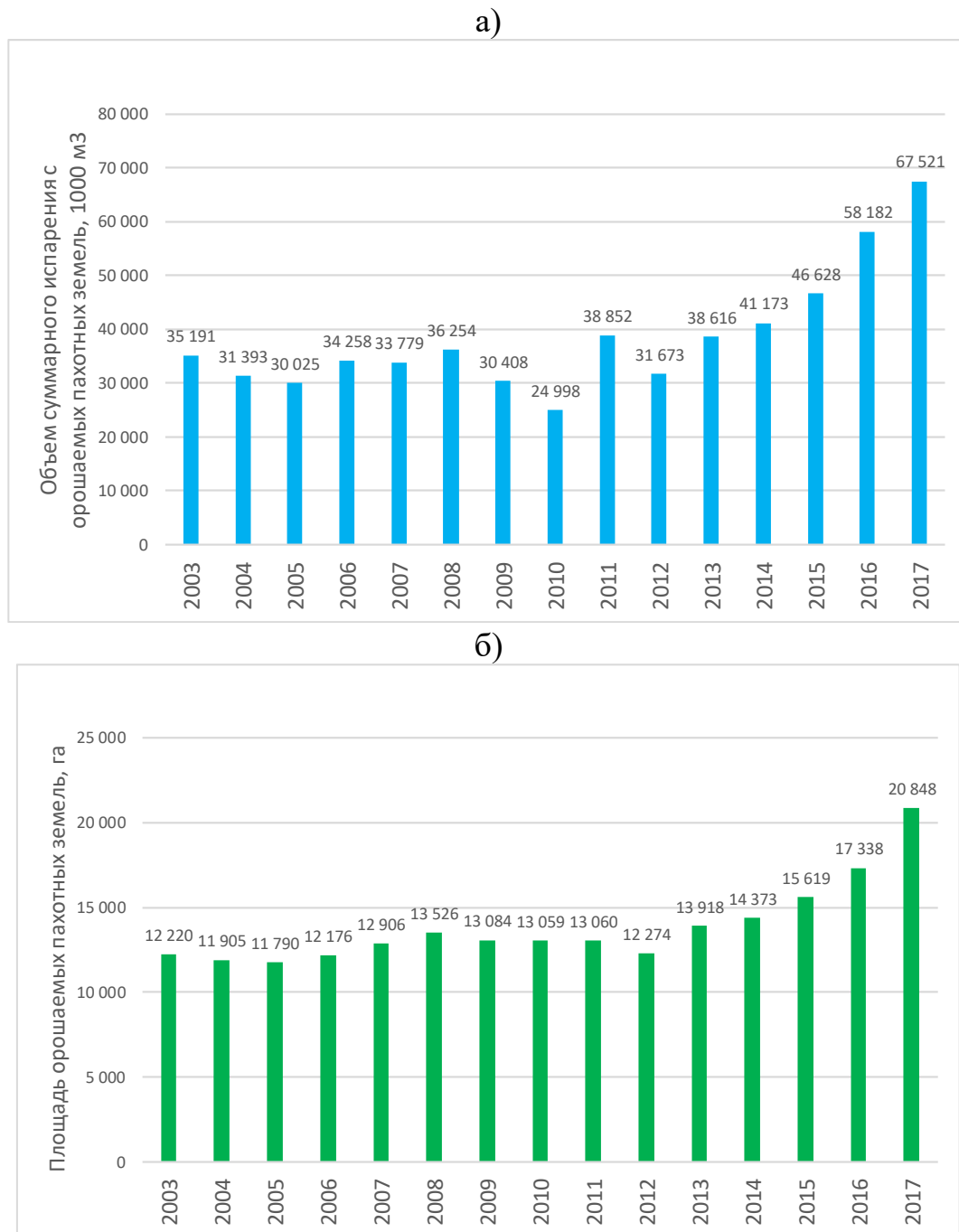


Рисунок 4.2 – Диаграммы временных рядов региональных характеристик геодатасета $ETav^{OPZ}$ подвида ЗП «орошаемые пахотные земли»: а) объем суммарного испарения $vETav_j^{OPZ}$ за оросительный период; б) площадь ведения орошаемого земледелия S_j^{OPZ}

Аналогичные региональные характеристики геодатасета $ETav^{HPPZ}$ подвида ЗП «неорошаемые пахотные земли» $vETav_j^{HPPZ}$ (суммарного объема испарения за

оросительный период) и $S_j^{\text{НПЗ}}$) (площади ведения неорошаемого земледелия) j -го года были рассчитаны по следующим выражениям

$$vETav_j^{\text{НПЗ}} = \sum_i^{I_{\text{нз}}} ETav_{j,i} \cdot S_{j,i} \cdot Ir_{j,i} - vETav_j^{\text{ОПЗ}}, \quad (4.4)$$

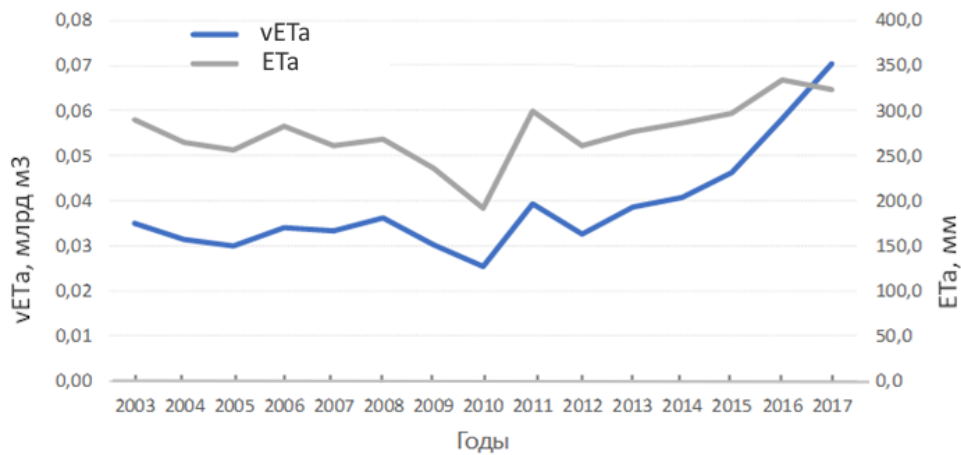
$$S_j^{\text{НПЗ}} = S_j^{\text{ПЗ}} - \sum_i^{I_{\text{нз}}} S_{j,i} \cdot Ir_{j,i} - vETav_j^{\text{ОПЗ}}, \quad (4.5)$$

На следующем шаге рассчитанные временные ряды обоих подвидов ЗП были использованы для расчета значений осредненных по площади региональных потоков этих подвидов (рисунок 4.3) по следующим выражениям

$$\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}} = \frac{vETav_j^{\text{ОПЗ}}}{S_j^{\text{ОПЗ}}}, \quad (4.6)$$

$$\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}} = \frac{vETav_j^{\text{НПЗ}}}{S_j^{\text{НПЗ}}}, \quad (4.7)$$

а)



б)

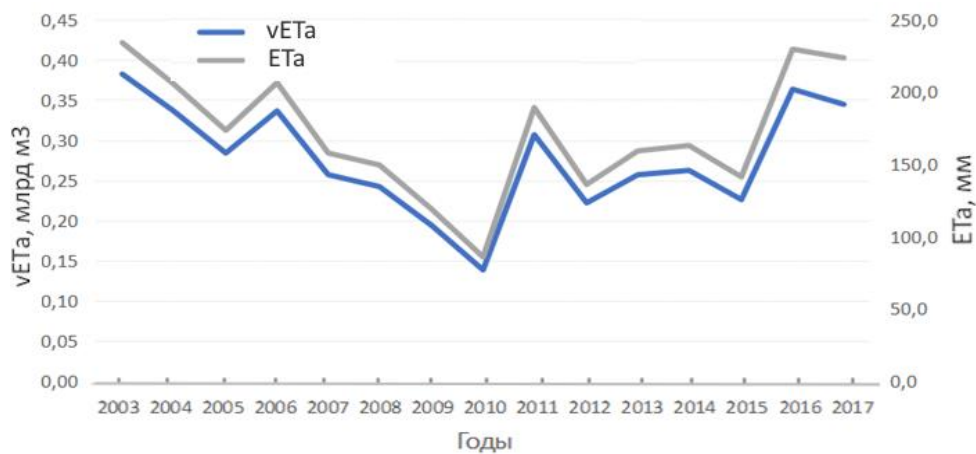


Рисунок 4.3 – Диаграммы временных рядов объема $vETav$ и среднего по площади потока суммарного испарения $ETav$, соответствующих: а) ОПЗ; б) НПЗ

Результаты визуального анализа представленных на рисунке 4.3 временных рядов обеих региональных характеристик ОПЗ и НПЗ имеют ряд значимых особенностей. Первой из них является отличие поведения профилей временных рядов объемов суммарного испарения и средних региональных потоков на контурах ОПЗ и НПЗ. Так в случае подвида «неорошаемые пахотные земли» (рисунок 4.3 б), профили обоих временных рядов в полупериод 2003–2010 гг. имеют пилообразный вид с общим отрицательным трендом и постепенным взаимным сближением по мере приближения к 2010 году. Во второй же полупериод 2010–2017 гг. профили этих же рядов имеют аналогичную синхронность, несколько более выраженную пилообразность, наряду с относительно устойчивым положительным трендом. Отмеченные особенности, по-видимому, являются отражением сложившихся в неорошаемом земледелии технологических практик, результативность которых практически всецело зависит от погодных условий, когда более высокие нормы летних осадков в соответствующие годы приводят к более высоким значениям объемов суммарного испарения $vETav_j^{НПЗ}$ и соответствующих региональных потоков $\overline{ETav_j^{НПЗ}}$, а в годы с меньшими нормами летних дождевых осадков имеет место их синхронное уменьшение. Из этого следует достаточно очевидный вывод о неприменении (или применения, но в недостаточном объеме) в практике неорошаемого земледелия 2003–2017 гг. на территории МР технологий, способствующих более эффективному использованию дождевых осадков вегетационного периода.

Несколько иная картина прослеживается при визуальном анализ временных рядов ОПЗ (рисунок 4.3 а), которая характеризуется, во-первых, более мягкими формами этих рядов в оба полупериода в сравнении с НПЗ, а во-вторых, значительно меньшими скоростями тренда в первый полупериод, и в-третьих - рассогласованием синхронности во второй полупериод, которое не наблюдается у временных НПЗ. При этом если первые два из отмеченных отличий находят свое объяснение в стабилизирующей роли орошения при флуктуации погодных условий в вегетационный период, то объяснение третьей может быть связано с наличием

помимо положительного тренда осадков в полупериод 2010–2017 г. (рисунок 2.5) одного или нескольких драйверов, дополнительно способствующих увеличению потоков ET_{av} . Одним из таких драйверов являлся прогрессивный рост площадей ОПЗ, которые в 2012 году составляли порядка 4 % от площади пахотных земель, а в 2017 году увеличились в 1,5 раза, достигнув порядка 6 %. Однако, простой рост этих площадей за счет установки дополнительных ДМ-КД не мог сам по себе, без наличия другого драйвера привести к более высокой скорости увеличения регионального потока $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ}$, в сравнении со скоростью увеличения регионального объема суммарного испарения $vET_{av_j}^{ОПЗ}$. По-видимому, такого рода драйвер мог иметь место в результате изменения поливного режима, позволивших создавать более эффективный водный режим корнеобитаемого слоя почвенного покрова орошаемых агроценозов.

На рисунке 4.4 приведены временные ряды средних и медианных значений региональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ}$.

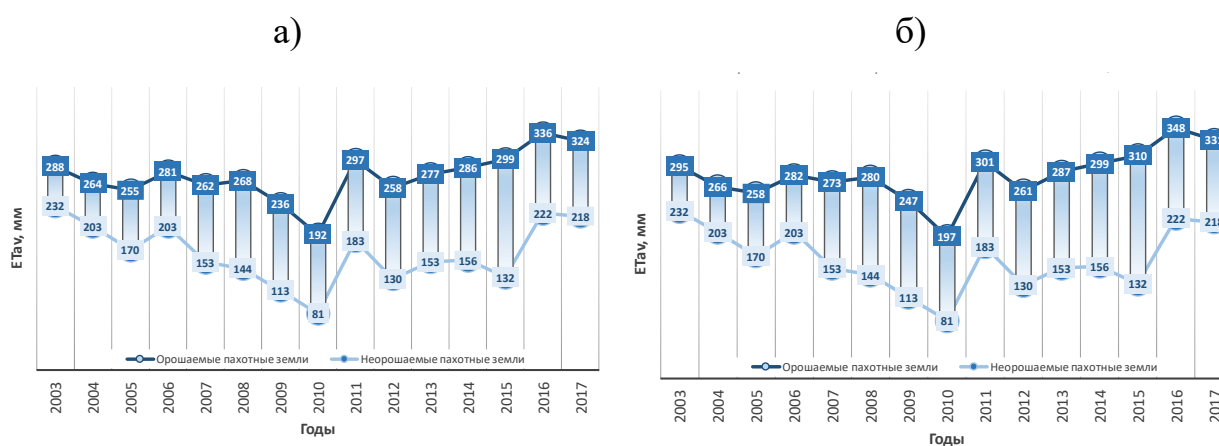


Рисунок 4.4 – Диаграммы временных рядов средних и медианных значений региональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ}$ за 2003–2017 гг.

Представленные на рисунке 4.4 диаграммы временных рядов средних и медианных значений региональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ}$ исследуемого периода 2003–2017 гг., свидетельствуют о значимом превышении соответствующих потоков с контуров ОПЗ над аналогичными потоками с контуров НПЗ. Этот достаточно закономерный результат физически вызван более высоким

пополнением запасов продуктивной почвенной влаги КС-ПП в результате ведения орошения. Отметим при этом, что отмеченное превышение значений временных рядов обеих мер центральной тенденции регионального потока $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$ над значениями аналогичных рядов регионального потока $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$, имеет немного более значимую разницу в случае медианных значений (рисунок 4.4 б). При этом важно также отметить, что в исключительно засушливый 2010 г., когда в поливной период практически не выпадали осадки и на неорошаемых агроценозах практически все посевы выгорели, а урожай был списан, на орошаемых агроценозах удалось получить пусть и невысокий, но крайне необходимый урожай.

Характеризуя динамику регионального потока $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$ в первый полупериод (2003–2010 гг.), необходимо отметить так же отрицательное влияние не только погодных условий, но также и сложной экономической ситуации ведения орошаемого земледелия в связи с высокими ценами на подачу воды, а также несовершенством и физической изношенностью используемой в те годы дождевальной техники. Это приводило, с одной стороны, к сокращению оросительных норм против рекомендованных, а также к большим непроизводительным потерям поливной воды [250] в результате грунтового стока воды [194], возникающего из-за поливов большими нормами.

В противоположность первому полупериоду второй полупериод (2010–2017 гг.) характеризуется положительным трендом обоих временных рядов медианных и средних значений региональных потоков $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$ и $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$. Это связано, с одной стороны с увеличением норм летних осадков, а с другой – общим улучшением экономической ситуации, а также техническом перевооружении орошаемого земледелия. Так, если в первой половине второго полупериода величины разностей между значениями обоих региональных потоков варьировали в пределах 110÷120 мм, что уже было выше аналогичного показателя второй половины первого полупериода, то уже начиная с 2014 года эта разность начала расти, достигнув 130 мм и 150 мм в 2014 год и 2015 год, соответственно. При этом

необходимо также отметить, что, судя по величине регионального потока $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$, 2015 г. относился к засушливому, что нашло свое отражение в уменьшении его значения в сравнении с предыдущим 2014 г. Однако, несмотря на это произошло увеличение регионального потока $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$, что нашло свое отражение в отмеченном выше рассогласовании синхронности. Увеличение же разности между значениями региональных потоков $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$ и $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$ стабилизировалось в относительно благополучные по уровню летних осадков 2016 и 2017 года, достигнув значений, порядка 120–130 мм.

Другим важным результатом анализа увеличения разности между региональными потоками $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$ и $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$, которое начало проявляться, начиная с 2007 г., является отмеченное увеличение оросительных норм. В то же время период, последовавший за самым неблагоприятным 2010 годом, когда была зафиксирована минимальная норма летних осадков за исследуемый период, совпал с началом реконструкции ПОС и КОС. В результате этой реконструкции происходила, с одной стороны, замена морально и технически устаревших ДМ на новые, а с другой — установка новых ДМ на участках, где в предыдущие годы было прекращено орошение. Очевидно, что оба эти фактора проявились в результате начала реализации ФЦП «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» [252]. Таким образом модернизация ДМ могла способствовать более эффективному использованию поливной воды агроценозами, нашедшему отражение в уменьшении ее потоков в почвенно-грунтовые слои, расположенные ниже КС-ПП, что и нашло свое отражение в увеличении регионального потока $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$. Таким образом, результаты анализа временных рядов региональных потоков $\overline{ETav}_j^{\text{ОПЗ}}$ и $\overline{ETav}_j^{\text{НПЗ}}$ во второй полупериод (2010–2017 гг.) со всей очевидностью оказались тесно связаны с экстенсивным и интенсивным развитием орошаемого земледелия и техническим обновлением дождевальной техники, произошедшими под влиянием реализации вышеупомянутой федеральной целевой программы.

Отметим, что полученное в результате проведенных расчетов значение регионального потока $\overline{ET}_{av2012}^{опз}$ за 2012 г. достаточно близко к значению, представленному в ранее опубликованной работе по оценке эффективности орошения с использованием данных ДЗЗ посевов люцерны, размещенных на территории ПОС, а также ниже вдоль реки Волги на территории ОПХ ВолжНИИГиМ (южнее на 50–60 км) и на территории ООО «Березовское» (южнее на 100–110 км) [25, 234, 238]. Рассчитанные при этом значения эффективности использования поливной воды для посевов люцерны на ПОС показали, что соответствующие значения лежали в пределах 50–55%. Предполагая, что в 2015–2017 гг. орошение посевов люцерны проводилось с той же оросительной нормой 150 мм, что и в 2012 г., но с использованием новых ДМ с менее грузными и более дробными поливными нормами, можно считать, что это способствовало увеличению эффективности использования поливной воды на 50%, доведя их до величин порядка 70–75% (в диапазоне 60–90%). Эти показатели соответствуют аналогичным результатам орошения посевов люцерны на территории ОПХ ВолжНИИГиМ в 2012 г. [25, 234, 238].

4.1.4. Анализ связи региональных характеристик потока ET_{av} с орошаемых пахотных земель с нормами летних осадков

Другим результатом проведенного статистического анализа слоев датасета ET_{av} контуров ОПЗ и НПЗ, является их связь с зарегистрированными на метеостанции г. Ершов нормами летних осадков. Сопоставительный анализ такой связи представляет интерес и достаточно правомочен ввиду соседства соответствующих контуров этих земель, что по всей очевидности способствовало выпадению на них одинаковых норм дождевых осадков.

В продолжение сопоставительного анализа рядов $(\overline{ET}_{av} - O_c)$ и (O_c) орошаемых и неорошаемых земель был проведен корреляционный анализ для 14 лет исследуемого периода 2003–2009 гг. и 2009–2017 гг., за исключением 2010 г.

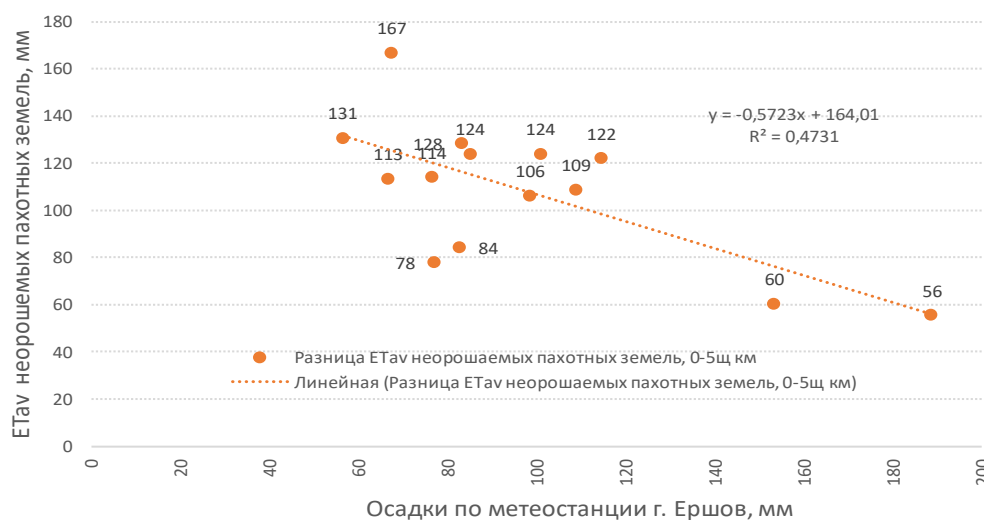
Ряд норм летних осадков был сформирован значениями сумм соответствующих месячных осадков (июнь, июль, август), зарегистрированных на метеостанции г. Ершов 2003–2007 гг., 2009 г., 2011–2017 гг. Значение члена ряда (O_c) за 2008 г. было принято в соответствии с данными, зафиксированными на метеостанции г. Маркс.

Исключение из вышеприведённого рассмотрения данных 2010г. было вызвано погодной аномалией, характеризовавшейся крайне низкой нормой летних осадков, которая привела к серьезным проблемам организации орошения из-за снижения уровня р. Волги в створе головных насосных станций ниже расчетного. Это существенно затруднило водозабор головными насосными станциями и сказалось в виде значительного снижения водоподачи, требуемой для пополнения влагозапасов почвенного покрова на орошаемых землях в сложившихся погодных условиях. Это нашло свое отражение при сравнении двух пар значений норм летних осадков 2010 г и 2012 г., которые составили 17 мм и 83 мм и соответствующих им практически равных значений разностей ($\overline{ET_{av}} - O_c$), которые составили 174 мм и 175 мм. Результаты корреляционного анализа, полученные в приложении MS Excel 2017 г., представлены на рисунке 4.5.

Представленные на рисунке 4.5 результаты оценки корреляционной связи между рядами ($\overline{ET_{av}} - O_c$) орошаемых и неорошаемых пахотных земель и норм летних осадков (O_c) имеют отрицательную связь. При этом полученное для случая неорошаемых пахотных земель значение коэффициента Пирсона, равное 0,47, указывает на невысокий уровень этой эмпирической связи. Соответствующий визуальный анализ указывает на две пары точек с высокими значениями (O_c). Очевидно, что эти значения существенно повлияли на придание исследованной эмпирической функции слабой линейной связи, без которых эта функция имела бы вид облака без значимой линейной корреляции, что в целом связано со значительным пространственным варьированием осадков. В свою очередь, одно из возможных объяснений наличия двух отмеченных пар точек с низкими значениями ($\overline{ET_{av}} - O_c$) и высокими значениями (O_c) может состоять в формировании в

соответствующие годы значимых потоков грунтового стока. В целом это соответствует имеющимся представлениям о влиянии осадков на величину суммарного испарения с обоих типов пахотных земель [246].

а)



б)

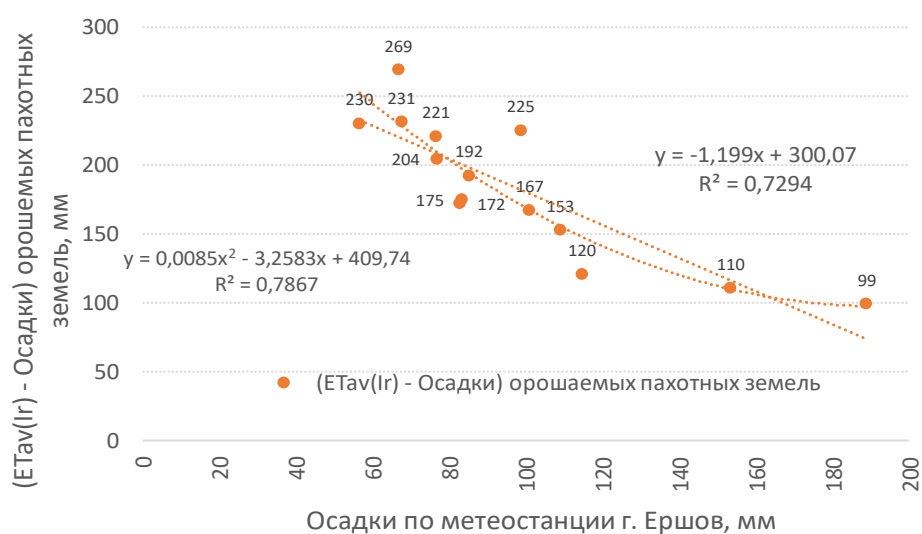


Рисунок 4.5 – Результат корреляционного анализа парных значений рядов региональных потоков ET_{av} территории Марковского района исследуемого периода 2003-2017г. и значений ряда норм летних осадков по метеостанциям г. Ершов и г. Маркс контуров: а) НПЗ; б) ОПЗ

В свою очередь представленная на рисунке 4.5б корреляционная эмпирическая отрицательная линейная связь между рядами $(\overline{ET_{av}} - O_c)$ и (O_c) для

случая орошаемых пахотных земель имеет достаточно высокое значение коэффициента Пирсона, равное 0,73. Это указывает на значительно более высокий уровень связи ряда $(\overline{ETav} - 0c)$ контуров ОПЗ с рядом норм летних осадков, чем в случае НПЗ. Одно из возможных объяснений этого результата, может быть основано на связи реализации орошения с выпадавшими осадками в соответствующие годы. Говоря иными словами выпадение осадков было консолидирующим фактором, влиявшим в течение исследованного периода (за исключением экстремального 2010 г.) на принятие решений о проведении поливов на контурах ДМ-КД. Такого рода консолидация за счет ведения схожих поливных режимов в зависимости от складывавшегося режима выпадения осадков, способствовала формированию значимо более коррелированных с ними региональных потоков $ETav$.

Другой результат проведенного корреляционного анализа, представленный на рисунке 4.5 б, был получен при переходе от линейной аппроксимационной функции к параболической функции. Несмотря на, возможно, не столь существенное увеличение значения квадрата коэффициента корреляции (с 0,73 до 0,79) при втором варианте аппроксимации, ее визуальное восприятие значительно улучшилось. Такой нелинейный характер корреляционной связи может быть связан с рядом неопределенностей, которые обусловлены пространственным варьированием норм летних осадков с одной стороны и практикой ведения орошения различными собственниками — с другой.

4.2. Оценка зональных характеристик потока $ETav$ орошаемых и неорошаемых пахотных земель

В настоящем подразделе приведены результаты развития усовершенствованного метода РАГеоД для пространственно-временного анализа геодатасета $ETav$ в соответствии с зональной удаленностью расположения контуров ОПЗ и НПЗ от уреза левого берега р. Волги. Необходимость классификации по этим зонам (зонирования) этих потоков вытекала из результатов,

полученных в предыдущих подразделах (4.1.3 и 4.1.4), и была связана с рядом неопределенностей при статистическом анализе функций распределений на региональном уровне.

Для решения задачи по разметке по зонам (зонированию) геодатасета $ETav$ были использованы 15 слоев производных геодатасетов $ETav^{ОПЗ}$ и $ETav^{НПЗ}$ (2003–2017 гг.), а также дополнительный слой (БГ.7) границ зон с разной удаленностью от уреза воды левого берега р. Волги.

Для решения второй части 4-й задачи, связанной с оценкой зональных характеристик геодатасетов $ETav^{ОПЗ}$ и $ETav^{НПЗ}$, была проведена классификация 15 слоев геодатасета $ETav$, по принадлежности семи соответствующим зонам с использованием дополнительного слоя масок их границ (БГ.7) (подраздел 2.3.4), что позволило сформировать два набора геодатасетов, соответствующих ОПЗ и НПЗ, каждый из которых содержал 105 слоев (15×7). В результате последовавших за этим расчетом статистических характеристик сформированных геодатасетов были получены статистические характеристики зональных потоков $ETav$, а также построены их профили. Проведенный дополнительный визуальный анализ созданных профилей позволил выявить ряд закономерностей.

Методика и результаты использованных процедур, а также результаты их применения представлены в ниже в этом разделе.

4.2.1. Зональные характеристики $ETav$ в пределах 0–5 км от уреза левого берега реки Волги

Контурные агроценозов, орошаемых ДМ-КД, идентифицированных в первой зоне (0–5 км) за временной интервал 2003–2017 гг., выделены на рисунке 4.6 а красным цветом. Динамика их количества, а также суммарной площади орошаемых ими агроценозов представлена на рисунке 4.6 б., доля которой от общей площади пахотных земель этой зоны (4931 га, таблица 2.3) составляла 0,8–2,6%. Там же на рисунке 4.6 в отображена динамика медианных значений датасетов $ETav$, соответствующих ОПЗ и НПЗ первой зоны.

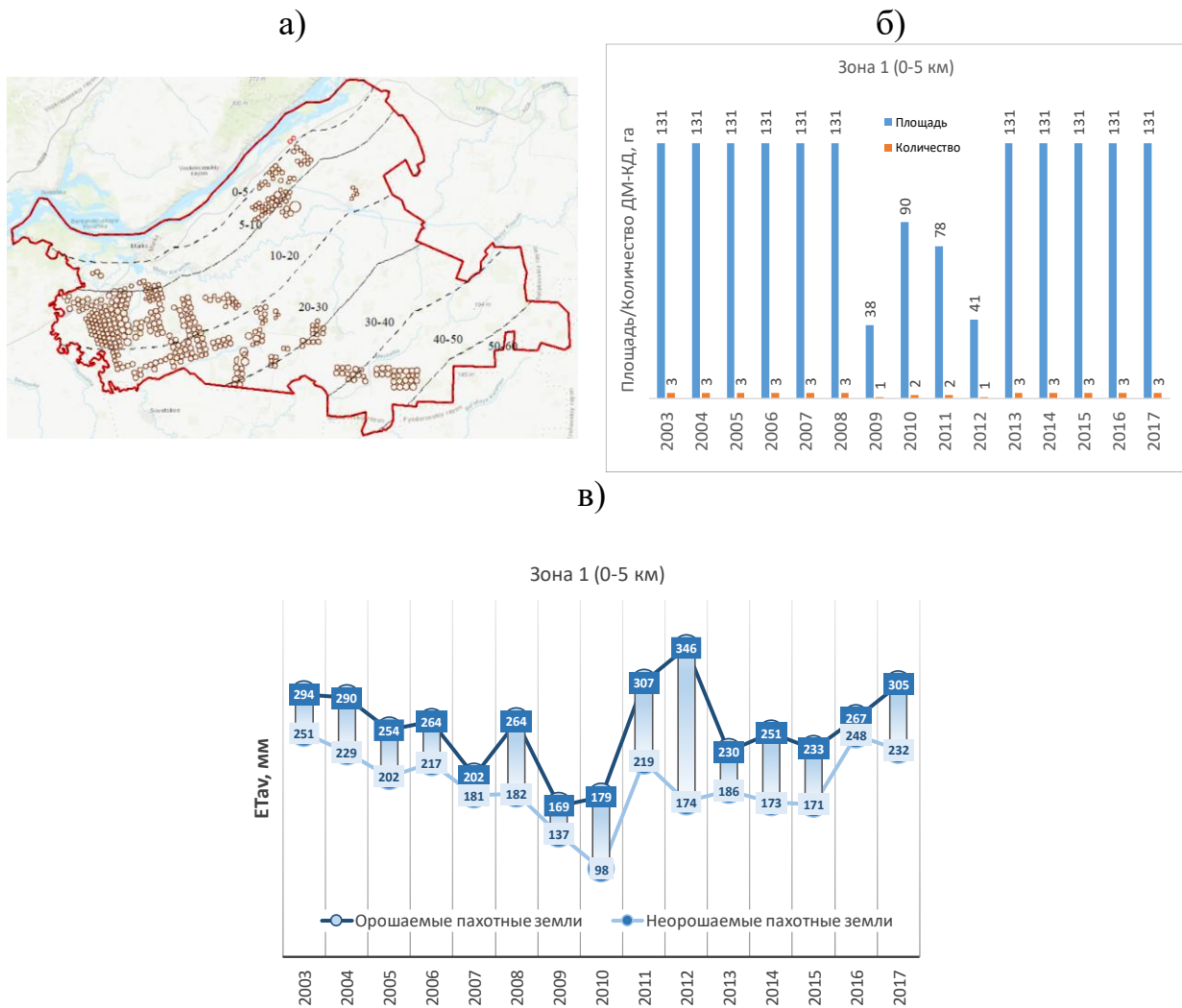


Рисунок 4.6 – Диаграммы характеристик первой зоны по удаленности от уреза левого берега р. Волги (0–5 км): а) мест расположения ДМ-КД (красный цвет); б) временных рядов количества ДМ-КД и площади их контуров; в) медианных значений зональных потоков $\overline{ETav}_j^{OPZ_1}$ и $\overline{ETav}_j^{NPZ_1}$

Количество ДМ-КД 1-й зоны в сравнении с другими зонами было низким, с минимумом в 2009–2012 гг., который был вызван выводом нескольких ДМ-КД из эксплуатации. Соответствующие временные ряды медианных значений зональных потоков $\overline{ETav}_j^{OPZ_1}$ и $\overline{ETav}_j^{NPZ_1}$ за 2003–2017 гг. имеют в целом схожий вид, демонстрируя два полупериода со снижением соответствующих показателей в период 2003-2010 гг. и с последующим их увеличением в период 2010-2017 гг. При этом разности медианных значений этих зональных потоков, которые в первый полупериод лежали в диапазоне 20–80 мм, а во второй – 20–170 мм, оказались

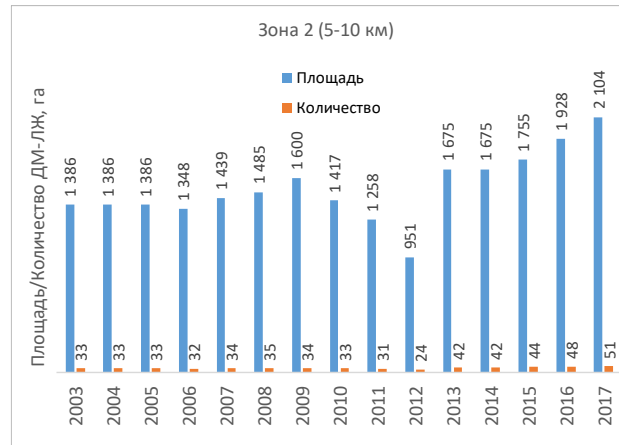
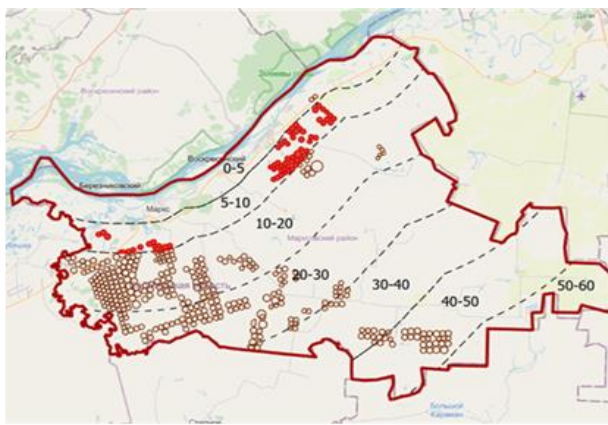
существенно меньше по сравнению с другими зонами. Одной из возможных причин отмеченного могут служить более высокие нормы осадков вегетационного периода этой зоны, а также соседней второй зоны, по сравнению с более удаленными от р. Волги зонами. Такое различие было отмечено в период проведения полевых экспериментов 2006–2009 гг.

4.2.2. Зональные характеристики ET_{av} в пределах 5–10 км от уреза левого берега реки Волги

Контурные агроценозов, орошаемых ДМ-КД, идентифицированных во второй зоне (5–10 км) за временной интервал 2003–2017 гг., выделены на рисунке 4.7 а красным цветом. Динамика их количества, а также суммарной площади орошаемых ими агроценозов представлена на рисунке 4.7 б., доля которой от общей площади пахотных земель в этой зоне (20 301 га, таблица 2.3) находилась в пределах 5–10%. Там же на рисунке 4.7 в отображена динамика медианных значений датасетов ET_{av} ОПЗ и НПЗ второй зоны. Количество функционировавших ДМ-КД во второй зоне с 2003 по 2009 год было достаточно стабильным (33–34 шт.), после чего снизилось до 24 машин в 2012 году, в основном за счет вывода из эксплуатации ДМ-КД, расположенных на территории обслуживаемой КОС. Затем количество стало увеличиваться, достигнув 51 шт. в 2017 году. В целом вид временных рядов медианных значений потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ_2}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ_2}$, а также величины разностей медианных значений сопоставимы с аналогичными характеристиками временных рядов первой зоны (рисунок 4.7). При этом разности медианных значений этих зональных потоков, которые в первый полупериод находились в диапазоне 20–80 мм, а во второй, начиная с 2011 года, стали увеличиваться и составили 30–170 мм, одной из причин которого могло быть обновления парка ДМ-КД.

а)

б)



В)

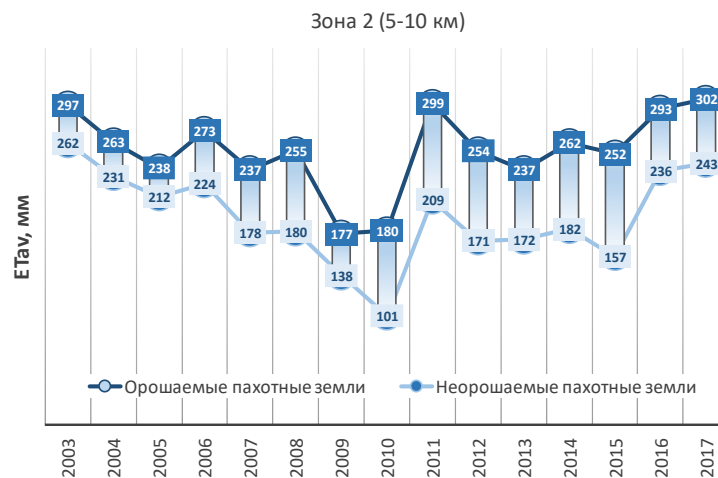


Рисунок 4.7 – Диаграммы характеристик второй зоны по удаленности от уреза левого берега р. Волги (5–10 км): а) мест расположения ДМ-КД (красный цвет); б) временных рядов количества ДМ-КД и площади их контуров; в) медианных значений зональных потоков $\overline{ETav}_j^{ОПЗ_2}$ и $\overline{ETav}_j^{НПЗ_2}$

Отметим также, что значения потока ETa , полученные на экспериментальном участке/полигоне (раздел 2.6) в результате наземного мониторинга влагозапасов на посеве орошаемой люцерны, расположенном в этой зоне, составили: в 2006 году (1-й год вегетации) – 231 мм, в 2007 году (2-й год вегетации) – 247 мм, а в 2008 году (3-й год вегетации) – 264 мм. Эти данные соответствуют потокам объемов $ETav$, полученным в результате космического мониторинга, что еще раз подтверждает адекватность использованных в проведенном исследовании оценок потоков $ETav$, полученных на основе данных последнего.

4.2.3. Зональные характеристики ET_{av} в пределах 10–20 км от уреза левого берега реки Волги

Контуры агроценозов, орошаемых ДМ-КД, идентифицированных в третьей зоне (10–20 км) за 2003–2017 гг., выделены на рисунке 4.8 а красным цветом. Динамика их количества, а также суммарной площади орошаемых ими агроценозов, представлена на рисунке 4.8 б., доля которой от общей площади пахотных земель этой зоны (51 650 га, таблица 2.3) лежала в пределах 12–20%. Там же на рисунке 4.8 в отображена динамика медианных значений датасетов ET_{av} , соответствующих ОПЗ и НПЗ третьей зоны.

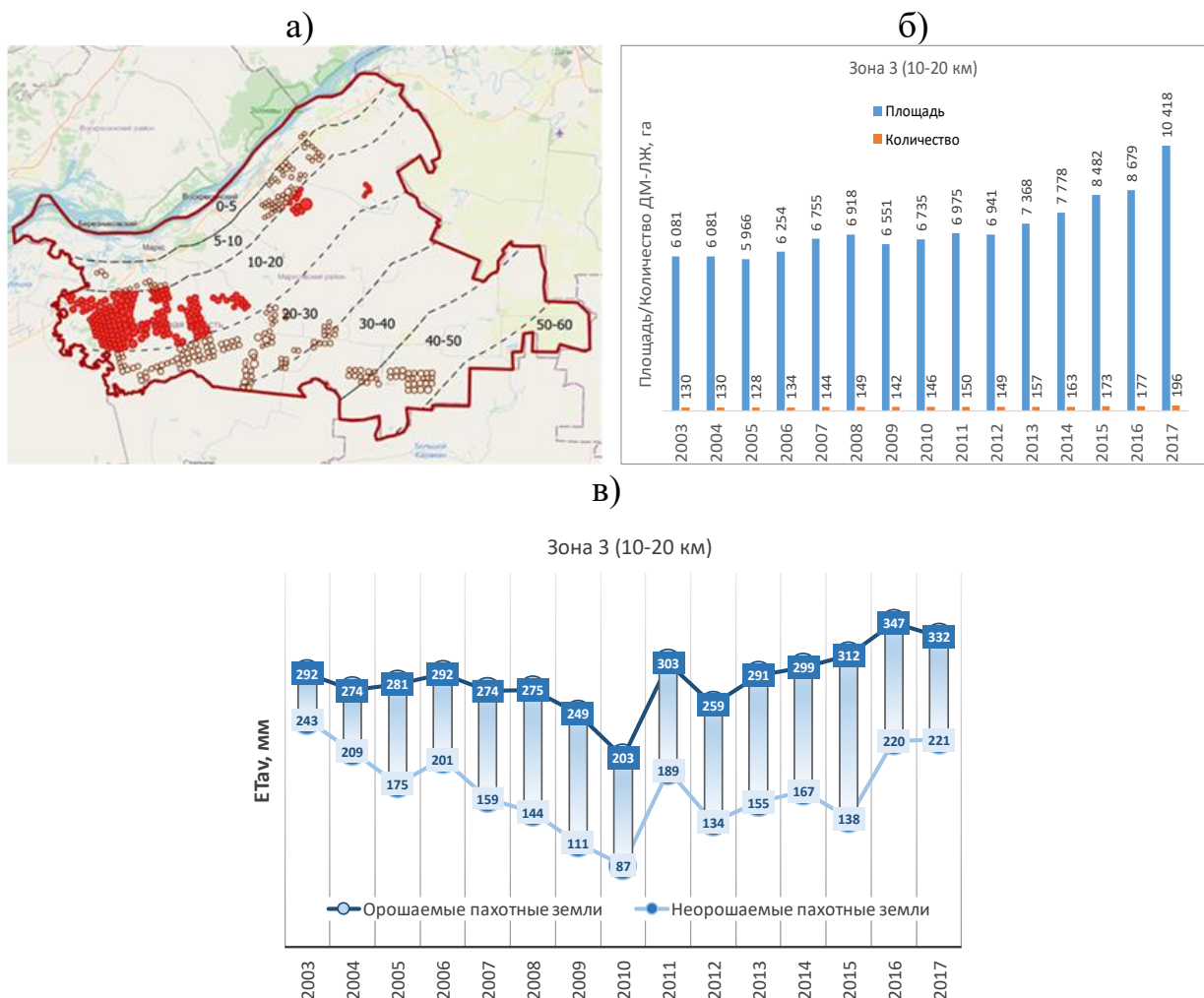


Рисунок 4.8 – Диаграммы характеристик третьей зоны по удаленности от уреза левого берега р. Волги (10–20 км): а) мест расположения ДМ-КД (красный цвет);

б) временных рядов количества ДМ-КД и площади их контуров; в) медианных

значений зональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ_3}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ_3}$

Количество ДМ-КД и площадь орошаемых ими агроценозов в третьей зоне были наибольшими из всех 6 зон, с тенденцией прогрессивного роста, которая достигла своего максимума в 2017 год. Общий вид временных рядов медианных значений потоков $\overline{ET}av_j^{OP3_3}$ и $\overline{ET}av_j^{HP3_3}$ этой зоны отличен от аналогичных показателей двух других зон, расположенных ближе к р. Волге (рисунки 4.6-4.7). Эти отличия заключаются в постепенном увеличении разницы между медианными значениями потоков $\overline{ET}av_j^{OP3_3}$ и $\overline{ET}av_j^{HP3_3}$, начиная с 49 мм в 2003 году и достигнув 131 мм в 2007 году, после чего разница стабилизировалась в пределах 120–140 мм с максимумом 174 мм в 2015 году.

4.2.4. Зональные характеристики $ETav$ в пределах четвертой зоны (20–30 км)

Контуры агроценозов, орошаемых ДМ-КД, идентифицированных в четвертой зоне (2030 км) за временной интервал с 2003 по 2017 года, выделены на рисунке 4.9 а красным цветом. Динамика их количества, а также суммарной площади орошаемых ими агроценозов представлена на рисунке 4.9 б. Доля этой площади от общей площади пахотных земель в данной зоне (41 413 га, таблица 2.3) лежала в пределах 8–12%. На рисунке 4.9 в отображена динамика медианных значений датасетов $ETav$, соответствующих ОПЗ и НПЗ четвертой зоны.

Динамика количества ДМ-КД и орошаемых ими площадей агроценозов в четвертой зоне имела волнообразный характер в исследуемый период 2003-2017 гг., с минимумом в 2012 г., после чего наступила стабилизация с резким увеличением в 2017 г. Общий вид временных рядов медианных значений зональных потоков $\overline{ET}av_j^{OP3_4}$ и $\overline{ET}av_j^{HP3_4}$, а также разностей между значениями этих рядов схожи с аналогичными характеристика временных рядов третьей зоны (рисунок 4.8).

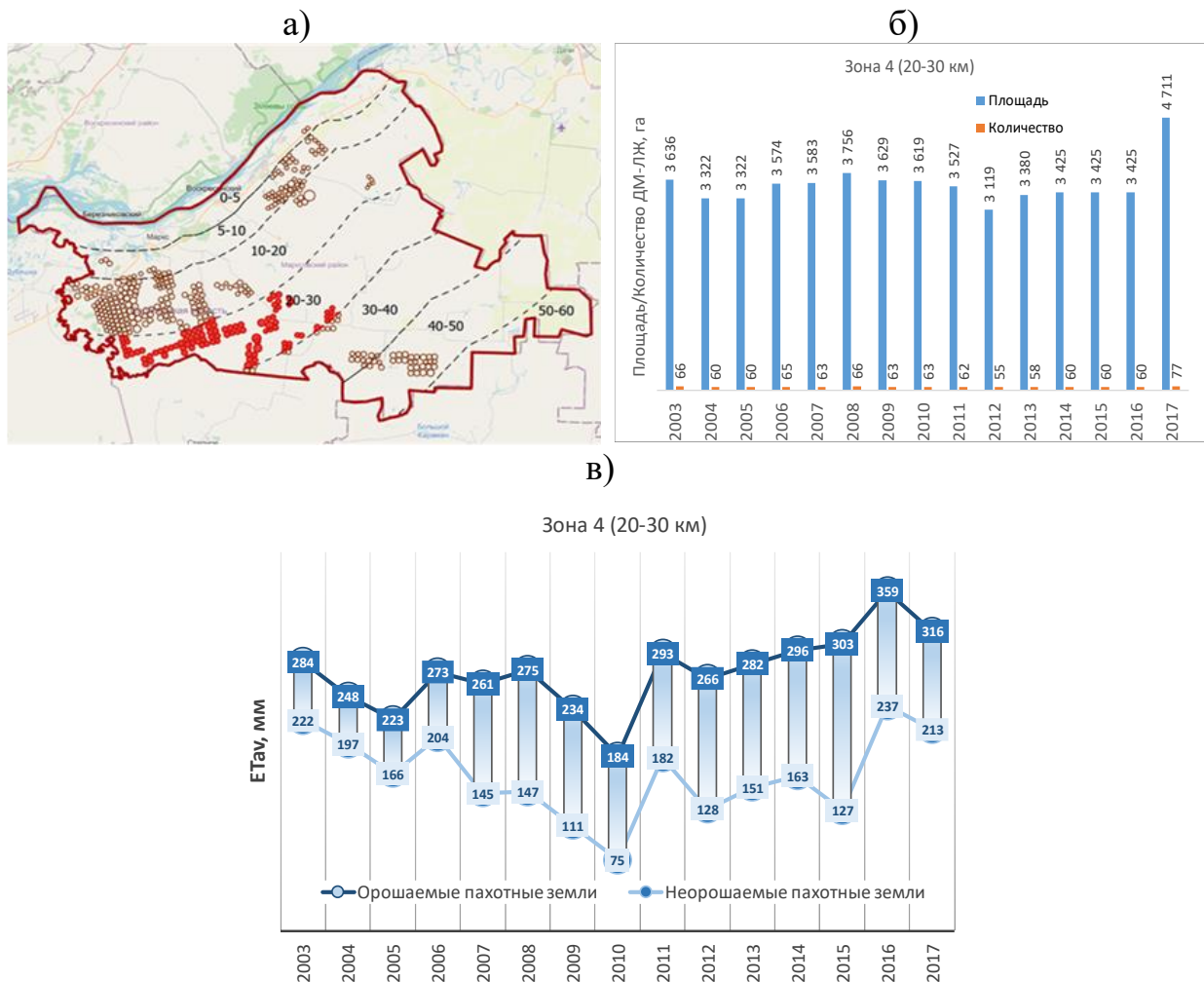


Рисунок 4.9– Диаграммы характеристик четвертой зоны по удаленности от уреза левого берега р. Волги (20-30 км): а) мест расположения ДМ-КД (красный цвет); б) временных рядов количества ДМ-КД и площади их контуров; в) медианных значений зональных потоков $\overline{ETav}_j^{ОПЗ_4}$ и $\overline{ETav}_j^{НПЗ_4}$

4.2.5. Зональные характеристики $ETav$ в пределах 30–40 км от уреза левого берега реки Волги

Контуры агроценозов, орошаемых ДМ-КД, идентифицированных в пятой зоне (30–40 км) за временной интервал 2003–2017 гг., выделены на рисунке 4.10 а красным цветом. Динамика их количества, а также суммарной площади орошаемых ими агроценозов представлена на рисунке 4.10 б., доля которой от общей площади пахотных земель этой зоны (41 413 га, таблица 2.3) находилась в

пределах 2–3%. Там же на рисунке 4.10 в отображена динамика медианных значений датасетов $\overline{ET}_{av}$, соответствующих ОПЗ и НПЗ пятой зоны.

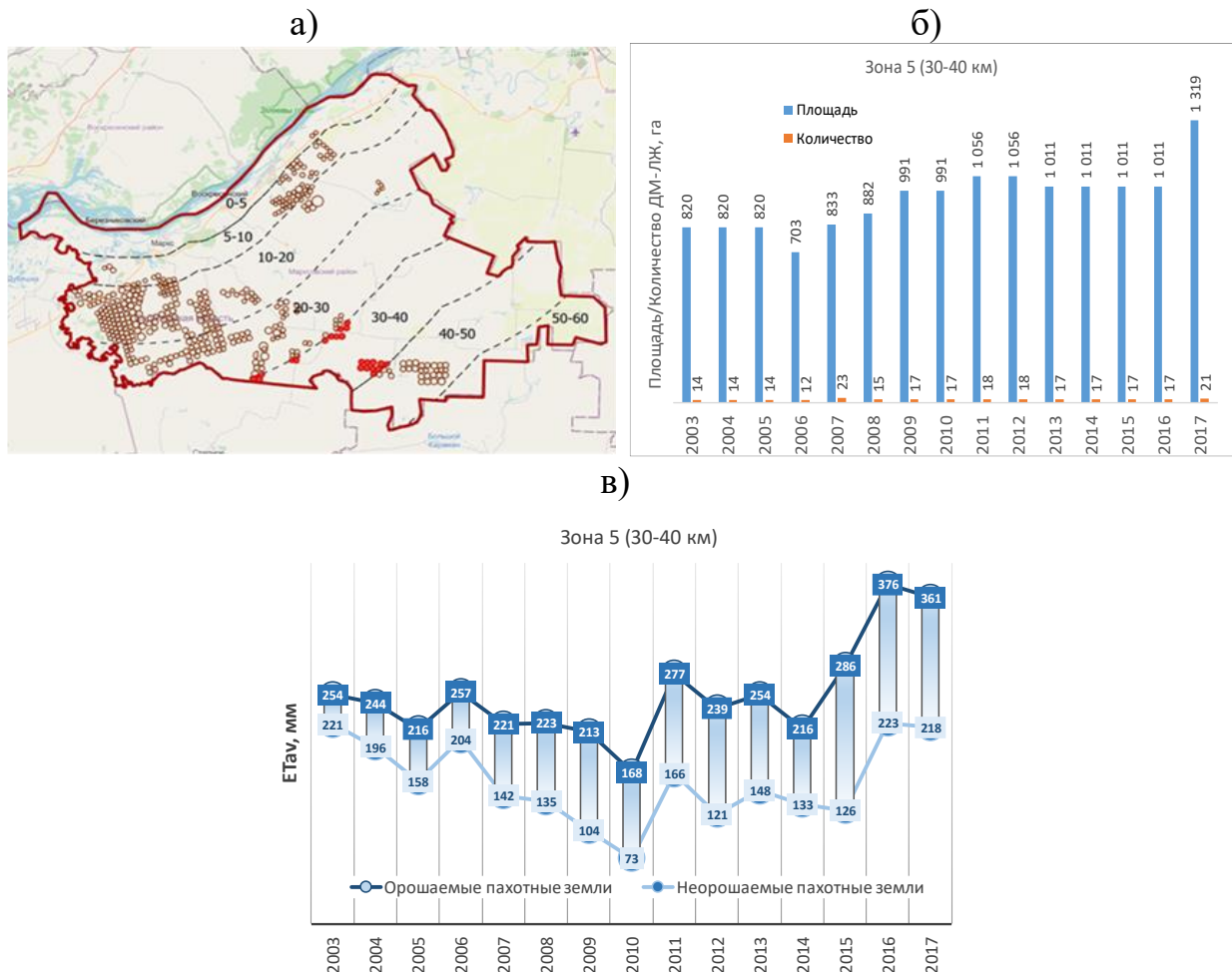


Рисунок 4.10 – Диаграммы характеристик пятой зоны удаленности от уреза левого берега р. Волги (30–40 км): а) мест расположения ДМ-КД (красный цвет); б) временных рядов количества ДМ-КД и площади их контуров; в) медианных значений зональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ_5}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ_5}$

Количество ДМ-КД и площади орошаемых агроценозов пятой зоны в период 2003–2012 гг. изменялся волнообразно, достигнув максимума в его конце, после чего произошло незначительное снижение, закончившееся резким увеличением в 2017 году. Общий вид временных рядов медианных значений зональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ_5}$ и $\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ_5}$ хотя внешне и схож с аналогичным видом таких же временных рядов второй зоны (рисунок 4.7), но отличается большими величинами разностей значений этих временных рядов.

4.2.6. Зональные характеристики ET_{av} в пределах 40–50 км от уреза левого берега реки Волги

Контуры агроценозов, орошаемых ДМ-КД, идентифицированных в шестой зоне (40–50 км) за 2003–2017 гг., выделены на рисунке 4.11 а красным цветом. Динамика их количества, а также суммарной площади орошаемых ими агроценозов представлена на рисунке 4.11 б, доля которой от общей площади пахотных земель этой зоны (23 007 га, таблица 2.3) находилась в пределах 0,5–9%. Там же на рисунке 4.10 в отображена динамика медианных значений датасетов ET_{av} , соответствующих ОПЗ и НПЗ шестой зоны.

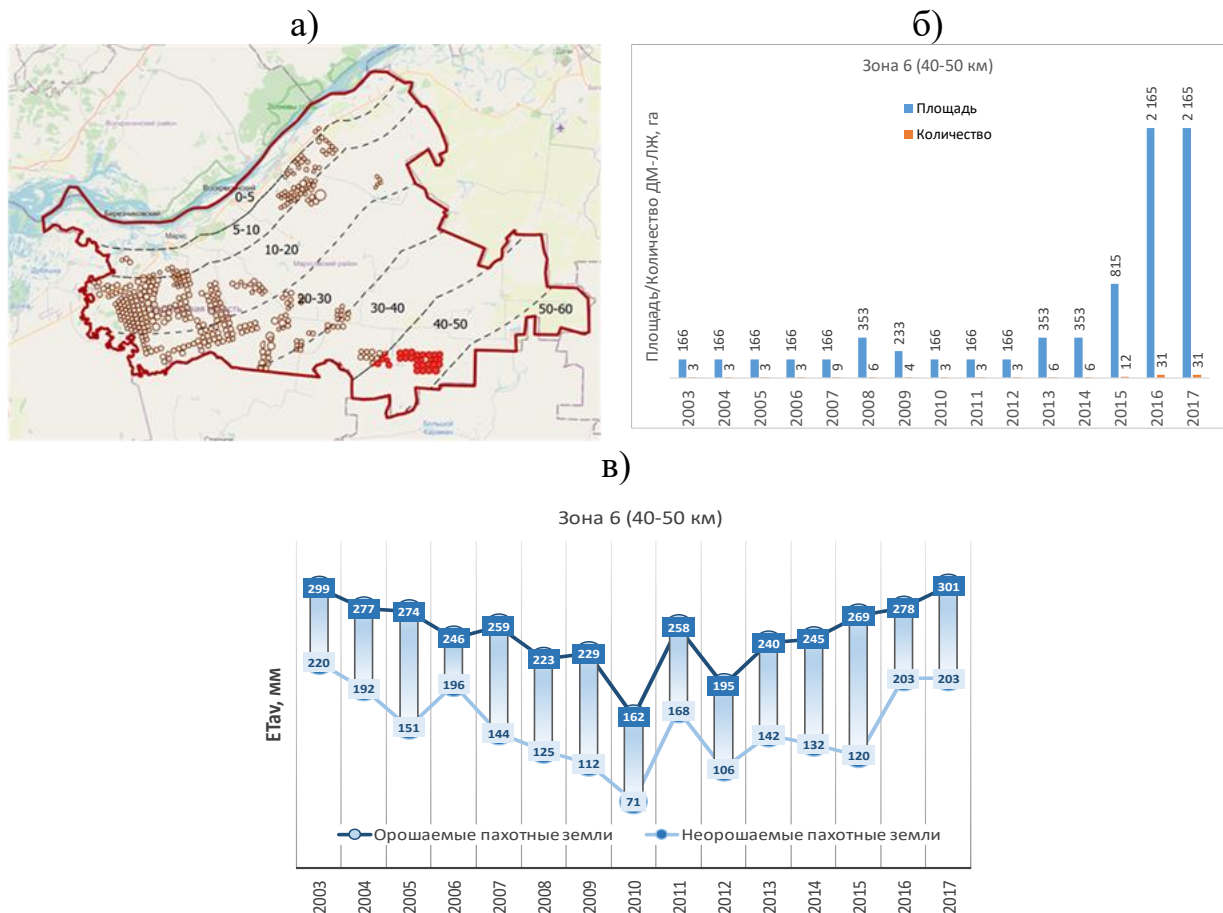


Рисунок 4.11 – Диаграммы характеристик шестой зоны удаленности от уреза левого берега р. Волги (40–50 км): а) мест расположения ДМ- КД и суммарной площади их контуров; в) медианных значений зональных потоков $\overline{ET}_{av_j}^{ОПЗ_6}$ и

$$\overline{ET}_{av_j}^{НПЗ_6}$$

Количество ДМ-КД и площадь орошаемых агроценозов в шестой зоне до 2014 года включительно были низкими, с резким приростом в 2015–2016 годах. Общий вид временных рядов медианных значений $\overline{ETav}_j^{опз_6}$ и $\overline{ETav}_j^{нпз_6}$, а также разностей между значениями этих рядов, схожи с аналогичными характеристиками таких же временных рядов третьей и четвертой зон (рисунки 4.8-4.9).

Выводы по четвертой главе:

1. С целью регионального и зонального анализа потока $ETav$ была проведена разметка записей соответствующего пространственно-временного куба по двум подвидам пахотных земель - «орошаемым пахотным землям и «неорошаемым пахотным землям»). Для этого были использованы слои контуров посевов, орошаемых с помощью дождевальных машин кругового действия, идентифицированные по данным космического мониторинга.

2. Применение усовершенствованной методики РАГеоД к слоям потока $ETav$, отнесенным к «орошаемым пахотным землям и «неорошаемым пахотным землям», позволило оценить их пространственно-временные характеристики на региональном и зональном уровне. Сопоставление региональных 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 стало изменение инфраструктуры оросительных систем в результате реализации федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы», направленное, как на обновление парка дождевальных машин кругового действия, так и на увеличение площадей орошаемых пахотных земель. Другие драйверы, по-видимому, были связаны с изменением структуры выращиваемых орошаемых сельскохозяйственных культур, а также изменениями поливных режимов.

3. Использование региональных значений потока $ETav$ орошаемых и неорошаемых пахотных земель для оценки их связи с нормами летных осадков выявило в обоих случаях отрицательные корреляционные связи. Для неорошаемых

пахотных земель низкий уровень достоверности линейной корреляционной функции объясняется высоким пространственным варьированием, как видов сельскохозяйственных культур, так и мест их расположения на территории Марковского района. В случае же орошаемых пахотных земель полученный высокий уровень достоверности идентифицированных, как линейной, так и параболической корреляционных функций объясняется ведением орошения агроценозов в соответствии с нормами выпадающих осадков.

4. Результаты зонального анализа характеристик потока ET_{av} орошаемых пахотных земель выявили незначительное уменьшение медианных значений временных рядов всех 6 зон. В то же самое время аналогичные результаты анализа характеристик потока ET_{av} неорошаемых пахотных земель, выявили их существенное прогрессивное уменьшение по мере удаления от уреза левого берега р. Волги. Это выразилось в тенденции увеличения разности между соответствующими значениями этих рядов. Отмеченное могло иметь место в результате применения более высоких оросительных норм для орошения агроценозов по мере удаления их местоположений от р. Волги.

5. В результате корреляционного анализа была выявлена тесная линейная связь между урожайностью девятнадцати орошаемых посевов люцерны второго года вегетации, расположенных на территории Марковского и Энгельсского районов Саратовской области (2012 г.), и сформированными на них потоками ET_{av} , которые были рассчитаны по TIR данным MODIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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:

1. 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.

2. 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.

3. 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 геодатасета *ETav* основных видов землепользования, а также двух подвидов пахотных земель — орошаемых и неорошаемых.

4. С использованием процедур усовершенствованного метода РАГеоД выявлено устойчивое ранжирование временных рядов потока *ETav* основных видов землепользования, заключавшееся 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.

5. Результаты кластерного анализа слоев геодатасета *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.

6. Обобщение результатов анализа региональных характеристик потока *ETa*, 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.

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

8. Результаты корреляционного анализа региональных характеристик потока ET_{av} 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, 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.

9. 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдразаков, Ф. К. Исследования и оценка технического состояния Комсомольской оросительной системы / Ф. К. Абдразаков, А. В. Носенко, А. В. Поморова // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 11. – С. 44–47.
2. Алпатыев А. М. Влагообороты в природе и их преобразования. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. – 323 с.
3. 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.
4. Антипов, А. Н. Проблемы ландшафтно-гидрологических исследований / А. Н. Антипов, Л. М. Короткий // География и природные ресурсы. – 1985. – № 2. – С. 164–166.
5. Будаговский, А. И. Испарение почвенной влаги / А. И. Будаговский, под ред. Акад. наук СССР. Ин-т географии, Москва: Наука, 1964. – 244 с.
6. Будыко, М. И. Испарение в естественных условиях / М. И. Будыко, Ленинград: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
7. Булыгина, О. Н. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России [Электронный ресурс] // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>.
8. Веб-сайт администрации Марковского района [Электронный ресурс]. URL: <https://marksadm.ru/apk.html> (дата обращения: 01.10.2023).
9. Великанов, М. А. Гидрология суши / М. А. Великанов, Москва: ГИМИЗ, 1964. – 402 с.
10. Водопотребление и качество воды при орошении сельскохозяйственных культур / А. Ю. Черемисинов, С. П. Бурлакин, И. П. Землянухин [и др.] // Агроэкологический вестник / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации, Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I. Том Выпуск 6. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2012. – С. 53–58.
11. Воронин, А. Д. Основы физики почв / А. Д. Воронин, Москва: МГУ, 1986. 1–244 с.
12. Глобус, А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Методы определения потенциала и коэффициентов переноса почвенной влаги. / А. М. Глобус, Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. – 355 с.

13. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения зернового (гранулометрического) и микроагрегатного состава. Введ. 1979-01-01. М.: Стандартиформ, 2008. – 16 с.
14. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. Введ. 1992-07-01. М.: Стандартиформ, 2008. – 6 с.
15. Гусев, Е. М. Исследование влияния различных способов оценки модельных параметров на точность воспроизведения речного стока на основе модели SWAP / Е. М. Гусев, О. Н. Насонова // Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34, № 3. – С. 299–309.
16. Демакина, И. И. Агрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса / И. И. Демакина, Б. В. Фисенко, А. Ю. Моршнев // Заметки ученого. – 2023. – № 7. – С. 365–368.
17. Дьяконов, К. Н. Геофизика ландшафта. Биоэнергетика, модели, проблемы: Учебно-методическое пособие / К. Н. Дьяконов. – Москва : Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" Издательский Дом (типография), 1991. – 96 с.
18. Дубенок, Н. Н. Режим орошения сеяных многолетних трав, выращиваемых на склоновых участках в условиях Центрального района Нечерноземной зоны РСФСР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Дубенок Николай Николаевич. - Волгоград, 1984. - 22 с.
19. 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.
20. 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.
21. Ермолаева, О. С. Применение сочетания технологий ГИС-ДЗЗ-ГНСС-ИИ для пространственно-временного анализа потоков суммарного испарения с орошаемых и богарных пахотных земель (на примере Марковского района Саратовской области) / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Материалы IV Международной научной конференции «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, 13–15 сентября 2023 г. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2023. – С. 16–24.
22. Ермолаева, О. С. Результаты анализа потоков суммарного испарения орошаемых и неорошаемых 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. – С. 365.

23. 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.

24. 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.

25. Зейлигер, А. М. Метод сканирующих характеристик измерения влажности почвы прибором TDR TRIME-FM3. Материалы международной научно-практической конференции / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева – Москва, 2009. – С. 220–223.

26. Зейлигер, А. М. Направления и инструменты информационно-технологического развития аграрного сектора экономики РФ / А. М. Зейлигер // Доклады ТСХА: Материалы Международной научной конференции, Москва, 06–08 декабря 2016 года. Том Выпуск 289, Часть 4. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2017. – С. 22–24.

27. Зейлигер, А. М. Оценка водного стресса орошаемых агроценозов с использованием данных агрогидрологической модели SWAP, наземного (метеорологического) и космического мониторинга / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения : сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН, Сочи, 02–07 октября 2017 года / Институт водных проблем Российской академии наук, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр. – Сочи: ООО "Лик", 2017. – С. 187–192.

28. Зейлигер, А. М. Результаты пространственно-временного анализа наборов данных ДЗЗ по испарению с поверхности суши MOD16 ET за 2000-2009 годы для территории Палласовского района Волгоградской области РФ / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева, А. Н. Кричевцова // Экология. Экономика. Информатика : Сборник статей в 3 томах / Российский фонд фундаментальных исследований, Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени Воровича И.И., Институт аридных зон, Южный научный центр Российской

академии наук. Том 3. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2015. – С. 35–48.

29. Зейлигер, А. М. Структурные модели почв и их гидрофизические характеристики: специальность 06.01.03 "Агрофизика": автореф дис. ... доктора биологических наук: 06.01.03/ Зейлигер Анатолий Михайлович. – Москва, 1995. – 38 с.

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

31. Зейлигер, А. М. Электромагнитный индуктометр для вертикального профилирования влагозапасов почвенно-грунтовой толщи / А. М. Зейлигер, М. Л. Тулузаков // Природообустройство. – 2013. – № 4. – С. 36–40.

32. Зейлигер, А.М. Полевые исследования преференциального водного потока в темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья // сб. ст. Проблемы научного обеспечения развития Эколого-экономического потенциала России под ред. И. С. Румянцева / А.М Зейлигер, О.С. Ермолаева. – Москва: МГУП, 2004. – С. 99–103.

33. Иванов, Н. Н. Об определении величин испаряемости / Н. Н. Иванов // Известия ВГО. – 1954. – № 2 (86). – С. 189–196.

34. 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.

35. Использование спутниковых данных ряда спектральных диапазонов при моделировании водного и теплового режимов территорий с разным характером увлажнения / Е. Л. Музылев, З. П. Старцева, Е. В. Волкова, Е. В. Василенко // 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, 2024. – С. 369.

36. 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.

37. Исследование предпочтительных потоков влаги в лугово-черноземной почве Саратовского Заволжья / С. В. Затицацкий, А. М. Зейлигер, А. К. Губер [и др.] // Почвоведение. – 2007. – № 5. – С. 585–598.
38. Карпачевский, Л. О. Динамика свойств почвы / Л. О. Карпачевский. – Москва: ГЕОС, 1997. – 170 с.
39. Качинский, Н. А. Физика почв / Н. А. Качинский. – Москва: Высшая школа, 1970. – 358 с.
40. Киселева А. Разведочный анализ (EDA) [Электронный ресурс] // Skillfactory. 2023. URL: <https://blog.skillfactory.ru/razvedochnyi-analiz-dannyh-eda/> (дата обращения: 29.09.2023).
41. Козловский, Ф. И. Почва как зеркало ландшафта и концепция информационной структуры почвенного покрова / Ф. И. Козловский, С. В. Горячкин // Почвоведение. – 1996. – № 3 – С. 288–297.
42. 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.
43. Константинов, А. Р. Нормирование орошения: методы, их оценка, пути уточнения/ А. Р. Константинов, Э. А. Струнников // Гидротехника и мелиорация. – 1986. – № 1 – С. 19–28.
44. Константинов, А. Р. Водный и тепловой режим орошаемых полей / А. Р. Константинов, под ред. Л. П. Серякова. – Ленинград: Ленингр. политехн. ин-т, 1979. – 80 с.
45. Константинов, А. Р. Тепловой и водный режим Украины / А. Р. Константинов, Л. И. Сакали, Н. И. Гойса, Р. Н. Олейник, под ред. А. Р. Константинова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. – 592 с.
46. Кучмент, Л. С. Моделирование влагопереноса в системе почва-растительность-приземный слой атмосферы для гидрологических задач / Л. С. Кучмент, Ю. Г. Мотовилов, З. П. Старцева // Водные ресурсы. – 1989. – Т. 16, № 2. – С. 32–39.
47. Льгов, Г. К. Орошаемое земледелие / Г. К. Льгов. – Москва: Колос, 1979. – 191 с.
48. Мезенцев, В. С. Увлажненность Западно-Сибирской равнины / В. С. Мезенцев, И. В. Карнацевич. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. – 168 с.

49. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – Москва: Издательство «Мир», 1973. – 344 с.
50. Методика расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур на основе биоклиматического метода для европейской части СССР с применением ЭВМ / под ред. С.М. Алпатьева. Киев: Укр. НИИ гидротехники и мелиорации, 1973. 9 с.
51. Михеев, П. А. Научное обоснование режимов орошения основных сельскохозяйственных культур современной дождевальной техникой в условиях Юга России / П. А. Михеев, Н. А. Иванова // Природообустройство. – 2016. – № 5. – С. 47–52.
52. Мичурин, Б. Н. Энергетика почвенной влаги / Б. Н. Мичурин. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 140 с.
53. Молчанов, А. А. Суммарное испарение и транспирация в лесу и на безлесных площадях / А. А. Молчанов // Москва: Географгиз. – 1963. – С 55–66.
54. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20 // Собрание законодательства РФ. 2020. № 4. Ст. 395.
55. Ольгаренко, Г. В., Турапин С. С. Аналитические исследования перспектив развития техники орошения в России : Информационно-аналитическое издание / Г. В. Ольгаренко, С. С. Турапин, Коломна: ИП Лавренев А.В. –2020. – 128 с.
56. Оросительные системы России: от поколения к поколению: Монография. В двух частях / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, С. М. Васильев, А. А. Чураев. Том Часть 1. – Новочеркасск: Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, 2013. – 283 с.
57. Основные результаты по оценке и картографированию опустынивания в Российской Федерации / Г. С. Куст, Н. Ф. Глазовский, О. В. Андреева [и др.] // Аридные экосистемы. – 2002. – Т. 8, № 16. – С. 7-27.
58. Остапчик, В. П. Информационно-советующая система управления орошением / В. П. Остапчик, В. А. Костромин, А. М. Коваль. –Киев: Урожай, 1989. – 245 с.
59. Панкова, Т. А. Адаптивное нормирование орошения люцерны на темно-каштановых почвах сухостепного Заволжья: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Панкова Татьяна Анатольевна. – Саратов, 2016. – 215 с.
60. Пенман, Х. Л. Растение и влага / Х. Л. Пенман. – Ленинград.: Гидрометеиздат, 1968. – 161 с.

61. Повышение эффективности использования оросительной воды природно-техническими системами в сельскохозяйственном производстве / В. Л. Бондаренко, Н. А. Иванова, А. В. Кувалкин, Г. Л. Лобанов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2015. – № 3(19). – С. 171–186.
62. 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.
63. Природообустройство: учебник для вузов / А. И. Голованов, Ф. М. Зимин, Д. В. Козлов, И. В. Корнеев, под ред. А. И. Голованов, Москва: КолосС, 2008. – 552 с.
64. Селянинов, Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата / Г. Т. Селянинов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – № 20. – С. 165–177.
65. Суммарное водопотребление зерновых культур на склоновых землях Центрального района РФ и зональные биоклиматические коэффициенты / Н. Н. Дубенок, Р. В. Калиниченко, М. В. Климахина [и др.] // Овощи России. – 2020. – № 6. – С. 120-125.
66. Суммарное водопотребление люцерны на дерново-подзолистых почвах водоразделов Московской области / В. В. Пчелкин, Ю. И. Сухарев, О. М. Кузина, С. О. Владимиров // Природообустройство. – 2020. – № 1. – С. 47-53.
67. Управление сельхозпредприятием с использованием космических средств навигации (ГЛОНАСС) и дистанционного зондирования Земли / Е. Ф. Шульга, А. О. Куприянов, В. К. Хлюстов [и др.]. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. – 286 с.
68. Федеральная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014 - 2020 годы» (утв. постановлением Правительства РФ от 12 октября 2013 г. N 922).
69. Формирование потенциала роста аграрного производства в России / И. П. Бандурина, И. И. Саенко, К. М. Камалова, В. В. Похвала // Вестник Академии знаний. – 2022. – № 50(3). – С. 56–60.
70. Циприс, Д. Б. Расчет водопотребления по метеопараметрам/ Д. Б. Циприс, Э. Г. Евтушенко // Гидротехника и мелиорация. – 1980. – № 9. – С. 40–42.
71. Шаров, И. А. Эксплуатация гидромелиоративных систем: для гидромелиорат. ин-тов и фак. / И. А. Шаров. – Москва: Сельхозгиз, 1959. – 576 с.

72. Щедрин, В. Н. Состояние и перспективы развития мелиорации земель на юге России / В. Н. Щедрин, Г. Т. Балакай // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2014. – № 3(15). – С. 1-15.
73. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation / M. Anderson [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 2007. – Vol.112. – D10117.
74. A Critical Evaluation on the Role of Aerodynamic and Canopy–Surface Conductance Parameterization in SEB and SVAT Models for Simulating Evapotranspiration: A Case Study in the Upper Biebrza National Park Wetland in Poland / K. Mallick, W. Loise, B. Nishan [et al.] // Water. – 2018. – Vol. 10. – Art. 1753.
75. A First Assessment of the 2018 European Drought Impact on Ecosystem Evapotranspiration / K.R. Ahmed, E. Paul-Limoges, U. Rascher, A. Damm // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – Art. 16.
76. A geo-informatics approach for estimating water resources management components and their interrelationships / U.W. Liaqat, U. K. Awan, M. F. McCabe, M. Choi // Agricultural Water Management. – 2016. – Vol. 178. – P. 89–105.
77. A Hybrid Data-Driven Machine Learning Technique for Evapotranspiration Modeling in Various Climates / M. Valipour, M. Sefidkouhi, M. Raeini-Sarjaz, Sa. M. Guzman // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, No. 6. – Art. 311.
78. A mathematical model for estimating the extent of solute- and water-flux heterogeneity in multiple sample percolation experiments / F. Stagnitti, L. Li, G. Allinson [et al.] // Journal of Hydrology. – 1999. – Vol. 215, No. 1–4. – P. 59–69.
79. A Multiscale Remote Sensing Model for Disaggregating Regional Fluxes to Micrometeorological Scales / M. Anderson, J. Norman, J. Mecikalski [et al.] // Journal of Hydrometeorology. – 2004. – Vol. 5, No. 2. – P. 343–363.
80. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation / W.G.M. Bastiaanssen, M. Menenti, R.A. Feddes, A. A. M. Holtslag // Journal of Hydrology. – 1998. – Vol. 212–213. – P. 198–212.
81. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation / W. G. M. Bastiaanssen, H. Pelgrum, J. Wang [et al.] // Journal of Hydrology. – 1998. – Vol.212–213. – P. 213–229.
82. A Review of Models and Micrometeorological Methods Used to Estimate Wetland Evapotranspiration / J. Z. Drexler, R. L. Snyder, D. Spano, K.T. Paw U // Hydrological Processes. – 2004. – Vol. 18, No. 11. – P. 2071–2101.

83. A role playing game to address future water management issues in a large irrigated system: Experience from Mali / T. Hertzog, J. Poussin, B. Tangara [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2014. – Vol. 137. – P. 1–14.
84. Acharya, B. Comparison of Satellite Driven Surface Energy Balance Models in Estimating Crop Evapotranspiration in Semi-Arid to Arid Inter-Mountain Region / B. Acharya, V. Sharma // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, No. 9. – P. 1822.
85. Adams, M. L. Methods of on-farm experimentation using precision agriculture technology / M. L. Adams, S. E. Cook. – St. Joseph, MI, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 1997. – P. 97–3020.
86. Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP/ J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, J.G. Kroes // *Vadose Zone Journal*. – 2008. – Vol. 7, No. 2. – P. 640–653.
87. Airborne Thermal Imagery to Detect the Seasonal Evolution of Crop Water Status in Peach, Nectarine and Saturn Peach Orchards / J. Bellvert, J. Marsal, J. Girona [et al.] // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, No. 1. – P. 39.
88. Allen, R. G. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. / R. G. Allen. - Div., Rome, 1992. - 50 p.
89. Allen, R. G. METRIC: Mapping Evapotranspiration at High Resolution – Applications Manual for Landsat Satellite Imagery/ R. G. Allen, M. Tasumi, R. Trezza. – Idaho: University of Idaho, 2005. – 107 p.
90. Allen, T. F. H. Hierarchy theory in hydrology/ T. F. H. Allen, P. C. Allen, D. L. Wixom // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. – 2009. – Vol. 6, No. 3. – P. 2931–2959.
91. An enhanced two-source evapotranspiration model for land (ETEMML): Algorithm and evaluation / Y. Yang [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – Vol. 168 3. – P. 54–65.
92. An evaluation of two inexpensive energy-balance techniques for measuring water use in flood-irrigated pecans (*Carya illinoensis*) / L. J. Simmons, J. Wang, T. W. Sammis, D. R. Miller // *Agricultural Water Management*. – 2007. – Vol. 88, No. 1– P. 181–191.
93. An exploratory analysis of land abandonment drivers in areas prone to desertification / C. Kosmas [et al.] // *CATENA*. – 2015. – Vol. 128. – P. 252–261.

94. Argaman, E. Monitoring the impact of surface albedo on a saline lake in SW Russia / E. Argaman, S. D. Keesstra, A. Zeiliger // *Land Degradation and Development*. – 2012. – Vol. 23, No. 4. – P.398–408.
95. Arnold, J. G. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling/ J. G. Arnold, N. Fohrer // *Hydrological Processes*. – 2005. – Vol. 19, No. 3. – P. 563–572.
96. Assessing the Spatial Pattern of Irrigation Demand under Climate Change in Arid Area / L. Wang [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9, No. 9. – Art. 526.
97. Bac-Bronowicz J. Regionalization of geographical space according to selected topographic factors in reference to spatial distribution of precipitation: application of artificial neural networks in GIS / J. Bac-Bronowicz, P. Grzempowski // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 77, No. 18. – P. 1–17.
98. Bac-Bronowicz, J. Cartographic Presentation of Spatio-Temporal Information Related to Point Data on the Basis of Historical Data from Atlases of Precipitation / J. Bac-Bronowicz; ed. by Livieratos E., Gartner G. – Vienna: Vienna University of Technology, 2010. – P. 1–10.
99. Bastiaanssen, W. G. M. SEBAL-Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey/ W. G. M. Bastiaanssen // *Journal of Hydrology*. – 2000. – Vol. 229, No. 1–2. – P. 87–100.
100. Blaney, H. F. Determining Water Requirements in Irrigated Areas From Climatological and Irrigation Data / H.F. Blaney, W.D. Criddle. – Washington, DC: US Department of Agriculture, 1950. – 48 p.
101. Bramley, R. G. V. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application / R. G. V. Bramley // *Crop and Pasture Science*. – 2009. – Vol. 60, No. 3. – P. 197–217.
102. Busch, N. E. Workshop on Micrometeorology / N. E. Busch, D. A. Haugen. - Boston: American Meteorological Society, 1973. – 392 p.
103. Chiew, F.H.S. Penman-Monteith, FAO-24 Reference Crop Evapotranspiration and Class-A Pan Data in Australia / F.H.S. Chiew, N.N. Kamaladasa, H.M. Malano [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 1995. – Vol. 28, No. 1. – P. 9–21.
104. Colaizzi, P.D. Two-Source Energy Balance Model Estimates of Evapotranspiration Using Component and Composite Surface Temperatures / P.D. Colaizzi, W.P. Kustas, M.C. Anderson // *Advances in Water Resources*. – 2012. – Vol. 50. P. 134–151.

105. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator / R. D. Jackson, S. B. Idso, R. J. Reginato, P. J. Pinter // *Water Resources Research*. – 1981. – Vol. 17, No. 4. – P. 1133–1138.
106. Castellví, F. Combining Surface Renewal Analysis and Similarity Theory: A New Approach for Estimating Sensible Heat Flux / F. Castellví // *Water Resources Research*. – 2004. – Vol. 40, No. 5. – Art. W05201.
107. Castellví, F. Surface energy-balance closure over rangeland grass using the eddy covariance method and surface renewal analysis / F. Castellví, R. L. Snyder, D. D. Baldocchi // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2008. – Vol. 148, No. 6. – P. 1147–1160.
108. Cha, M. Estimation of Seasonal Evapotranspiration for Crops in Arid Regions Using Multisource Remote Sensing Images / M. Cha, M. Li, X. Wang // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, No. 15. – Art. 2398.
109. Chapter 4. Evaporation and Transpiration / R. G. Allen, W.O. Pruitt, J.A. Businger [et al.] // *Hydrology Handbook (Manual and Reports on Engineering Practice No. 28)* / Task Committee on Hydrology Handbook of Management Group D of ASCE. – New York: ASCE, 1996. – P. 125–252.
110. Chartzoulakis, K. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change / K. Chartzoulakis, M. Bertaki // *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. – 2015. – Vol. 4. – P. 88–98.
111. Chow, V.T. *Applied Hydrology* / V.T. Chow, D.R. Maidment, L.W. Mays. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 572 p.
112. Comparing Evapotranspiration Products of Different Temporal and Spatial Scales in Native and Managed Prairie Pastures / R. Bajgain, X. Xiao, P. Wagle [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, No 1. – P. 82.
113. Comparison of 16 Models for Reference Crop Evapotranspiration Against Weighing Lysimeter Measurement / X. Liu, C. Xu, X. Zhong [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2017. – Vol. 184. – P. 145–155.
114. Comparison of Five Models to Scale Daily Evapotranspiration from One-Time-of-Day Measurements / P. D. Colaizzi, S. R. Evett, T. A. Howell, J. A. Tolk // *Transactions of the ASABE*. – 2006. – Vol. 49, No. 5. – P. 1409–1417.
115. Comparison of medium spatial resolution ENVISAT-MERIS and terra-MODIS time series for vegetation decline analysis: A case study in central Asia / J. Tüshaus, O. Dubovyk, A. Khamzina, G. Menz // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6, No. 6. – P. 5238–5256.

116. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)/ R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome: FAO, 1998. – 300 p.
117. Digital Georeferenced Databases on Land Resource Issues in Russia // Land Resources of Russia - IIASA [Электронный ресурс]. URL: <https://previous.iiasa.ac.at/Research/LUC/Russia-land> (дата обращения: 05.05.2022).
118. Duarte, R. Input-Output and Water: Introduction to the Special Issue / R. Duarte, H. Yang // Economic Systems Research. – 2011. – Vol. 23, No. 4. – P. 341–351.
119. EarthExplorer [Electronic resource]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 14.03.2021).
120. Effects of Land-Use and Land-Cover Change on Evapotranspiration and Water Yield in China During 1900–2000 / M. Liu, H. Tian, G. Chen [et al.] // Journal of the American Water Resources Association. – 2008. – Vol. 44, No. 5. – P. 1193–1207.
121. Emerging Methods for Noninvasive Sensing of Soil Moisture Dynamics from Field to Catchment Scale: A Review / H.R. Bogaen, M. Herbst, J.A. Huisman [et al.] // WIREs Water. – 2015. – Vol. 6, No. 2. – P. 635–647.
122. Ermolaeva, O. Inversion Technique to Derive Soil Moisture Profile from Overlapping Measurements with TDR TRIME-FM Tube Sensor Prob / O. Ermolaeva, A. Zeyliger / EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria, 19–14 April 2020. – Vienna, Austria, 2020. – P. 11329.
123. Ermolaeva, O. S. A Method to Increase Vertical Resolution of Soil Moisture Measurements by TDR Trime FM3 Tube Sensor Probe / Ermolaeva O.S., Zeiliger A.M. // Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1 – 6 August 2010. – Brisbane, Australia, 2010. - P. 1–4.
124. Erratum: Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity / C. J. Vörösmarty [et al.] // Nature. – 2010. – Vol. 468, No. 7321. – Art. 334.
125. Estimating Fluxes on Continental Scales Using Remotely Sensed Data in an Atmospheric–Land Exchange Model / J. R. Mecikalski, G. R. Diak, M. C. Anderson, J. M. Norman // Journal of Applied Meteorology. – 1999. – Vol. 38, No. 9. – P. 1352–1369.
126. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship / W. P. Kustas, J. M. Norman, M. C. Anderson, A. N. French // Remote Sensing of Environment. – 2003. – Vol. 85, No. 4. – P. 429–440.
127. Estimation of Canal Water Deficit Using Satellite Remote Sensing and GIS: A Case Study in Lower Chenab Canal System / M. Waqas [et al.] // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 47, No. 6. – P. 909–920.

128. Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment / K. Rawat, S. Singh, A. Bala, S. Szabó // *Agricultural Water Management*. – 2019. – Vol. 213. – P. 922–933.
129. Estimation of Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Olive Orchard Using Thermal and Multispectral Cameras Placed on a Helicopter-Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV) / S. Ortega-Farías, S. Ortega-Salazar, T. Poblete [et al.] // *Remote Sensing* 2016. – 2016. – Vol. 8, No.8. – Art. 638.
130. ET Mapping for Agricultural Water Management: Present Status and Challenges / P. H. Gowda, J. L. Chavez, P. D. Colaizzi [et al.] // *Irrigation Science*. – 2008. – Vol. 26, No. 3. – P. 223–237.
131. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate /N. Bhattarai, S. B. Shaw, L. J. Quackenbush [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2023. – Vol. 49. – P. 75–86.
132. Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Methodological Approach / C. Kosmas [et al.] // *Environmental Management*. – 2014. – Vol. 54, No. 5. – P. 951–970.
133. Evaluation of Penman-Monteith Model Based on Sentinel-2 Data for the Estimation of Actual Evapotranspiration in Vineyards / V. García-Gutiérrez, C. Stöckle, P.M. Gil; F.J. Meza // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 213, No. 3. – Art. 478.
134. Evaluation of SEBS for estimation of actual evapotranspiration using ASTER satellite data for irrigation areas of Australia /W. Ma, M. Hafeez, H. Ishikawa, Y. Ma // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2012. – Vol. 112, No. 3. – P. 609–616.
135. Evaluation of TSEB turbulent fluxes using different methods for the retrieval of soil and canopy component temperatures from UAV thermal and multispectral imagery/ H. Nieto, W. P. Kustas, A. Torres-Rúa [et al.] // *Irrigation science*. – 2019. – Vol. 37, No. 3. – P. 389–406.
136. Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards / K. R. Knipper, W. P. Kustas, M. C. Anderson [et al.] // *Irrigation Science*. – 2018. – Vol. 37, No. 3. – P. 431–449.
137. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy/ R. G. Allen, L. S. Pereira, T. A. Howell, M. E. Jensen // *Agricultural Water Management*. – 2011. – Vol. 98, No. 6. – P. 899–920.
138. Evapotranspiration Partitioning at Field Scales Using TSEB and Multi-Satellite Data Fusion in The Middle Reaches of Heihe River Basin, Northwest China / Y. Li, C. Huang, W. P.Kustas [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 12, No. 19. – Art. 3223.

139. Evolutionary algorithm for reference evapotranspiration analysis / S. Jovic, B. Nedeljkovic, Z. Golubovic, N. Kostic // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2018. – Vol. 150. – P. 1–4.
140. Feasibility of using the two-source energy balance model (TSEB) with Sentinel-2 and Sentinel-3 images to analyze the spatio-temporal variability of vine water status in a vineyard / J. Bellvert, C. Jofre-Čekalović, Ana Pelechá [et al.] // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, No. 14. – P. 2299.
141. Feddes, R. A. Crop Factors in Relation to Makkink Reference-Crop Evapotranspiration / R. A. Feddes // *Evaporation and Weather: Proceedings and Information* // R. A. Feddes; ed. by J. C. Hooghart. - The Hague: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. - P. 33-45.
142. Feddes, R. A., Simulation of field water use and crop yield / R. A. Feddes, P. J. Kowalik, H. Zaradny. – Wageningen, The Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 189 p.
143. Flanagan, L. B. Seasonal and Interannual Variation in Carbon Dioxide Exchange and Carbon Balance in a Northern Temperate Grassland / L. B. Flanagan, L. A. Wever, P. J. Carlson // *Global Change Biology*. – 2002. – Vol. 8, No. 7. – P. 599–615.
144. Fooladmand, H. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ET o in south of Iran / H. Fooladmand, S. H. Ahmad // *Irrigation and Drainage*. – 2009. – Vol. 58, No. 2. – P. 234–245.
145. Fu, C. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon / C. Fu // *Global and Planetary Change*. – 2003. – Vol. 37, No. 3-4. – P. 219–229.
146. Glavan, M. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats of Catchment Modelling with Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model / M. Glavan, M. Pintar // *Water Resources Management*. – 2012. – Vol. 26, No. 12. – P. 3603–3613.
147. Global Trends in Evapotranspiration Dominated by Increases Across Large Cropland Regions / M. Javadian, A. Behrangi, W. K. Smith, J. B. Fisher // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, No. 7. – Art. 1221.
148. Grekousis, G. Further Widening or Bridging the Gap? A Cross-Regional Study of Unemployment across the EU Amid Economic Crisis / G. Grekousis // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 10, No. 6. – Art. 2167.
149. Guo, E. W. Estimating Evapotranspiration Using SEBAL Model and Landsat-8 RS Data / Guo E. W., Zhang L. J. // *Journal of Irrigation and Drainage*. – 2019. – Vol. 38, No. 4. – P. 83–89.

150. Guzinski, R. Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations / R. Guzinski, H. Nieto // *Remote Sensing of Environment*. – 2020. – Vol. 221, No. 9. – P. 157–172.
151. *Handbook of Precision Agriculture: Principles and Applications* / Blackmore S., Fountas S., Gemtos T., Griepentrog H. Europe / A. Srinivasan [et al.]; Ed. by A. Srinivasan. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 702 p.
152. Hargreaves, G. H. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature / G. H. Hargreaves, Z. A. Samani // *Applied Engineering in Agriculture*. – 1985. – Vol. 1, No. 2. – P. 96–99.
153. He, R. Evapotranspiration Estimate over an Almond Orchard Using Landsat Satellite Observations // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9. – P. 436.
154. Holmes, J. W. Measuring Evapotranspiration by Hydrological Methods / J. W. Holmes // *Agricultural Water Management*. – 1984. – Vol. 8, No. 1. – P. 29–40.
155. Hydrological Cycle in the Heihe River Basin and Its Implication for Water Resource Management in Endorheic Basins / X. Li, G. Cheng, Y. Ge [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. – Vol. 123, No. 2. – P. 890–914.
156. *Hydropedology: Synergistic integration of pedology and hydrology* / H. Lin, J. Bouma, Y. Pachepsky [et al.] // *Water Resources Research*. – 2006. – Vol. 42, No. 19. – W05301.
157. Impact of climate change on yield, irrigation requirements and water productivity of maize cultivated under the moderate continental climate of Bosnia and Herzegovina / R. J. Stricevic, N. Stojakovic, M. Vujadinovic-Mandic, M. Todorovic // *The Journal of Agricultural Science*. – 2018. – Vol. 156, No. 5. – P. 618–627.
158. Improving Water-Efficient Irrigation: Prospects and Difficulties of Innovative Practices / L. Levidow, D. Zaccaria, R. Maia [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2014. – Vol. 146. – P. 84–94.
159. Integrated Study of the Water-Ecosystem-Economy in the Heihe River Basin / G. Cheng, X. Li, W. Zhao [et al.] // *National Science Review*. – 2014. – Vol. 1, No. 3. – P. 413–428.
160. Integration of Soil Moisture in SEBS for Improving Evapotranspiration Estimation under Water Stress Conditions / M. Gokmen, Z. Vekerdy, W. Verhoef [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 121. – P. 261–274.
161. Intercomparison of Four Remote-Sensing-Based Energy Balance Methods to Retrieve Surface Evapotranspiration and Water Stress of Irrigated Fields in Semi-Arid Climate / J. Chirouze, G. Boulet, L. Jarlan [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2014. – Vol. 18, No. 3. – P. 1165–1188.

162. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review / S. I. Seneviratne [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – Vol. 99, No. 3-4. – P. 125–161.
163. Ivanova, G. F. Changeability of Maximally Possible and Total Evaporation on Territory of Saratov Area in the Conditions of Changing Climate / G. F. Ivanova, N. G. Levitskaya // *Series: Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 15, No. 3. – P. 5–8.
164. Janjić, J. Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review / J. Janjić, L. Tadić // *Earth*. – 2023. – Vol. 4, No. 2. – P. 331–344.
165. Jensen, M. E. *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements* / M. E. Jensen, R. G. Allen. - Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016. – 744 p.
166. Kalma, J. D. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data / J. D. Kalma, T. R. McVicar, M. F. McCabe // *Surveys in Geophysics*. – 2008. – Vol. 29, No. 4–5. – P. 421–469.
167. Kireicheva, L. V. Evaluation of the efficiency of irrigation in a zonal soil sequence / L. V. Kireicheva, N. P. Karpenko // *Eurasian Soil Science*. – 2015. – Vol. 48, No. 5. – P. 524–532.
168. Kustas, W. P. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling / W. Kustas, M. Anderson // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2009. – Vol. 149, No. 12. – P. 2071–2081.
169. Kustas, W. P. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover / W. P. Kustas, J. M. Norman // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 1999. – Vol. 94, No. 1. – P. 13–29.
170. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development / J. G. Arnold, R. Srinivasan, R. S. Muttiah, J. R. Williams // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. – 1998. – Vol. 34, No. 1. – P. 73–89.
171. Lemon, E. R. Photosynthesis Under Field Conditions. II. An Aerodynamic Method for Determining the Turbulent Carbon Dioxide Exchange Between the Atmosphere and a Corn Field / E. R. Lemon // *Agronomy Journal*. – 1960. – Vol. 52, No. 12. – P. 697–703.
172. Li, X. Progress in the study of oasis-desert interactions / X. Li, K. Yang, Y. Zhou // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2016. – Vol. 230–231. – P. 1–7.
173. Linking satellite derived LAI patterns with subsoil heterogeneity using large-scale ground-based electromagnetic induction measurements / Rudolph S. [et al.] // *Geoderma*. – 2015. – Vol. 241–242. – P. 262–271.

174. Mann, H. B. Nonparametric Tests against Trend / H. B. Mann // *Econometrica*. – 1945. – Vol. 13. – P. 245–259.
175. Mapping and Assessing Water Use in a Central Asian Irrigation System by Utilizing MODIS Remote Sensing Products / Conrad C., Dech S.W., Dubovyk O. [et al.] // *Irrigation and Drainage Systems*. – 2007. – Vol. 21. – P. 9606.
176. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery / J.A.J. Berni, P.J. Zarco-Tejada, G. Sepulcre-Cantó [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol. 113, No. 11. – P. 2380–2388.
177. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle / J. Bellvert, P. J. Zarco-Tejada, J. Girona, E. Fereres // *Precision Agriculture*. – 2014. – Vol. 15, No. 4. – P. 361–376.
178. Mapping evapotranspiration with high-resolution aircraft imagery over vineyards using one-and two-source modeling schemes / T. Xia [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2016. – Vol. 20, No. 4. – P. 1523–1545.
179. 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. Zeyliger, K. Muzalevskiy, O. Ermolaeva [et al.] // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – Art. 9606.
180. Modeling Processes of Water and Heat Regime Formation for Agricultural Region Area (Russia) Utilizing Satellite Data / E. L. Muzylev, A. M. Zeiliger, Z. P. Startseva [et al.] // *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), Hammamet, Tunisia, 12–15 November 2018*. – Hammamet, Tunisia: Springer International Publishing, 2018. – P. 37–39.
181. Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion / R. Guzinski, H. Nieto, R. Jensen, G. Mendiguren // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, No. 9. – Art. 1433.
182. Monitoring and prediction of soil moisture spatial-temporal variations from a hydropedological perspective: A review / Q. Zhu [et al.] // *Soil Research*. – 2012. – Vol. 50, No. 8. – P. 625–637.
183. Monitoring daily evapotranspiration over two California vineyards using Landsat 8 in a multi-sensor data fusion approach / K. A. Semmens [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 185. – P. 155–170.
184. Monteith, J. L. Evaporation and environment / J. L. Monteith // *Symposia of the Society for Experimental Biology*. – 2024. – Vol. 19. – P. 205–34.

185. Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying // Handbook of Industrial Drying. 3rd ed. / ed. Mujumdar A.S. CRC Press, 2006.
186. Munn, R. E. Energy Budget and Mass Transfer Theories of Evaporation / R. E. Munn // Proceedings of the Hydrology Symposium, 1961. – P. 8–26.
187. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability / S. B. Idso, R. D. Jackson, P. J. Pinter [et al.] // Agricultural Meteorology. – 2023. – Vol. 24 – P. 45–55.
188. Norman, J. M. Source Approach for Estimating Soil and Vegetation Energy Fluxes in Observations of Directional Radiometric Surface Temperature / J. M. Norman, W. P. Kustas, K. S. Humes // Agricultural and Forest Meteorology. – 1995. – Vol. 77, No. 3–4. – P. 263–293.
189. O’Sullivan, D. Geographic Information Analysis/ D. O’Sullivan, D. J. Unwin. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley, 2010. – 432 p.
190. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review/ H. Vereecken [et al.] // Water Resources Research. – 2008. – Vol. 44, No. 4. – W00D06.
191. Operational Aspects of Satellite-Based Energy Balance Models for Irrigated Crops in the Semi-Arid U.S / M. Tasumi, R. Trezza, R. G. Allen, J. L. Wright // Irrigation and Drainage Systems. – 2005. – Vol. 19, No. 3-4. – P. 355–376.
192. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration/ R. G. Allen, M. E. Jensen, J. L. Wright [et al.] // Agronomy Journal. – 1989. – Vol. 81, No. 4. – P. 650–662.
193. Pokorný, J. Evapotranspiration / J. Pokorný. Springer, 2018. – 150 p.
194. Preferential water flows in meadow-chernozemic soil of the Saratov Transvolga region / S. V. Zatinatskii, A. M. Zeiliger, A. K. Guber [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2007. – Vol. 40, No. 5. – P. 532–543.
195. Priestley, C. H. B. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters / C. H. B. Priestley, R. J. Taylor // Monthly Weather Review. – 1972. – Vol. 100, No.82. – P. 81–92.
196. Prudhomme, C. Mapping Extreme Rainfall in a Mountainous Region Using Geostatistical Techniques: A Case Study in Scotland / C. Prudhomme, D. W. Reed // International Journal of Climatology. – 1999. – Vol. 19, No.12. – P. 1337–1356.
197. Quantification and Mapping of Satellite Driven Surface Energy Balance Fluxes in Semi-Arid to Arid Inter-Mountain Region / B. Acharya, V. Sharma, J. Heitholt [et al.] // Remote Sensing 2020. – Vol. 12. – P.4019.
198. Rosenberg, N. J. Microclimate: The Biological Environment / N. J. Rosenberg, B. L. Blad, S. B. Verma. – 2nd ed. – New York: Wiley, 1983. – 315 p.

199. Re-evaluation of the Power of the Mann-Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series / Wang F. [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8. – Art. 214.
200. Regional evapotranspiration from an image-based implementation of the Surface Temperature Initiated Closure (STIC1.2) model and its validation across an aridity gradient in the conterminous US / N. Bhattarai, K. Mallick, N. A. Brunsell [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2018. – Vol. 22. – P. 2311-2341.
201. Regional water balance based on remotely sensed evapotranspiration and irrigation: An assessment of the haihe plain, China / Y. Yang [et al.] // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6, No. 3. – P. 2514–2533.
202. Remote Sensing and Modelling Based Framework for Valuing Irrigation System Efficiency and Steering Indicators of Consumptive Water Use in an Irrigated Region / M. Usman, T. Mahmood, C. Conrad, H. U. Bodla // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, No. 22. – Art. 9711.
203. Remote Sensing Based Energy Balance Algorithms for Mapping ET: Current Status and Future Challenges / P. H. Gowda, J. L. Chávez, P. D. Colaizzi [et al.] // *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. – 2007. – Vol. 5, No. 50. – P. 1639-1644.
204. Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modelling to Services for the End Users / A. Calera, I. Campos, A. Osann [et al.] // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, No. 5. – Art. 1104.
205. Remote Sensing for Plant Water Content Monitoring: A Review/ C. Quemada, J. L. Gabriel, P. Zarco-Tejada [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, No. 11. – Art. 2145.
206. 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. – P. 319–322.
207. Ritsema, C. Behaviour and Management of Water Repellent Soils — Preface / C. Ritsema, L. Dekker // *Australian Journal of Soil Research*. – 2005. – Vol. 43, No. 7. – P. i–ii.
208. Roerink, G. J. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance / G. J. Roerink, Z. Su, M. Menenti // *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*. 2000. № 2 (25). C. 147–157.
209. Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action: World Food Summit, 13-17 November 1996, Rome, Italy. Rome: FAO, 1996. 43 p.

210. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications/ R. G. Allen, M. Tasumi, A. Morse [et al.] // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* – 2007 – Vol. 133, No. 4. – P. 395–406.
211. Savage, M. J. Estimation of evaporation using a dual-beam surface layer scintillometer and component energy balance measurements / M. J. Savage // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2009. – Vol. 149, No. 3. – P. 501–517.
212. Seasonal variation in radiation and energy balances of permanent pastures at different altitudes / M. Rosset [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 1997. – Vol. 86, No. 3. – P. 245–258.
213. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions/ W.G.M. Bastiaanssen E.J.M. Noordman, H. Pelgrum [et al.] // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 2005. – Vol. 131, No. 1. – P. 85–93.
214. Shadmani, M. Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests in Arid Regions of Iran / M. Shadmani, S. Marofi, M. Roknian // *Water Resources Management*. – 2012. – Vol. 26, No. 1– P. 211–224.
215. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves-Samani model and temperature forecasts / Y. Luo, X. Chang, S. Peng [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2014. – Vol. 136. – P. 42–51.
216. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters/ S. Anapalli, L. Ahuja, P. Gowda [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2016. – Vol.177. – P.274–283.
217. Sinclair, T. R. “Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass” by Harold L. Penman, *Proceedings of the Royal Society of London* / T. R. Sinclair// *Crop Science*. – 2019. – Vol. 59, No. 6– P. 2297–2299.
218. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review / D. A. Robinson, C. S. Campbell, J. W. Hopmans [et al.] // *Vadose Zone Journal*. – 2008. – Vol. 7, No. 1. – P. 358–389.
219. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field / N. Rodriguez-Alvarez, X. Bosch-Lluis, A. Camps [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 47, No. 11. – P. 3616–3624.
220. Spatial Patterns in Actual Evapotranspiration Climatologies for Europe / S. Stisen [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – Art. 2410.
221. Stanhill, G. Evapotranspiration / G. Stanhill ed. by D. Hillel // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. – Oxford: Elsevier, 2005. – P. 502–506.

222. Su, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes / Z. Su // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2002. – Vol. 6, No. 1. – P. 85–99.
223. Surface Flux Estimation Using Radiometric Temperature: A Dual-Temperature-Difference Method to Minimize Measurement Errors / J. M. Norman, W. P. Kustas, J. H. Prueger [et al.] // *Water Resources Research*. – 2000. – Vol. 36, No. 8. – P. 2263–2274.
224. Sustainable Agriculture for Water-Stressed Regions by Air-Water-Energy Management / A. Entezari, R.Z. Wang, S.X. Zhao [et al.] // *Energy*. – 2004. – Vol. 181. – P. 1121–1128.
225. Sustainable Development: Report of the 2nd Committee: General Assembly, 71st session. New York: UN, 2016. 28 p.
226. SWAT: Model use, calibration, and validation / J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman [et al.] // *Transactions of the ASABE*. – 2012. – Vol. 55, No. 4. – P. 1491–1508.
227. Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate / C. W. Thornthwaite // *Geographical review*. – 1948. – Vol. 38, No. 1. – P. 55–94.
228. Tasumi, M. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development / M. Tasumi, R. G. Allen // *Agricultural Water Management*. – 2007. – Vol. 88, No. 1-4. – P. 54–62.
229. The Aerodynamic Measurement of Photosynthesis over the Wheat Field / E. Inoue, N. Tani, K. Imai, S. Isobe // *Journal of Agricultural Meteorology*. – 1958. – Vol. 13, No. 4. – P. 121–125.
230. The Evapotranspiration Process in Green Roofs: A Review / S. Cascone, J. Coma, A. Gagliano, G. Perez // *Building and Environment*. – 2019. – Vol. 147. – P. 2601.
231. Thornthwaite, C. W Measurement of Evaporation From Land and Water Surfaces / C. W. Thornthwaite, B. Holzman. – Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1942. – 143 p.
232. Topp, G. C. State of the art of measuring soil water content / G. C. Topp // *Hydrological Processes*. – 2003. – Vol. 17, No. 14. – P. 2993–2996.
233. Topp, G. C. The Early Development of TDR for Soil Measurements / G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan // *Vadose Zone Journal*. – 2003. – Vol. 2, No. 4. – P. 492–499.
234. TRIME-FM User Manual. Imko Micromodultechnik GmbH, 2001. 22 p.
235. Turc, L. Water Requirements Assessment of Irrigation, Potential Evapotranspiration: Simplified and Updated Climatic Formula / L. Turc // *Annales Agronomiques*. – 1961. – Vol. 12, No. 3. – P. 13–49.

236. Tyagi, N. K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter / N. K. Tyagi, D. K. Sharma, S. K. Luthra // *Agricultural Water Management*. – 2000. – Vol. 45, No. 1. – P. 41–54.
237. Upscaling Evapotranspiration from a Single-Site to Satellite Pixel Scale / X. Li, S. Liu, X. Yang [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, No. 20. – Art. 4125.
238. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources / M. C. Anderson, R. G. Allen, A. Morse, W. P. Kustas // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol.122. – P. 50–65.
239. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-End Gap-Filled MOD16A2GF/A3GF) / S. W. Running, Q. Mu, M. Zhao, A. Moreno. NASA Earth Observing System, Collection 6, 2019. – 36 p.
240. Using High Resolution UAV Thermal Imagery to Assess the Variability in the Water Status of Five Fruit Tree Species Within a Commercial Orchard / V. Gonzalez-Dugo, P. Zarco-Tejada, E. Nicolas [et al.] // *Precision Agriculture*. – 2013. – Vol. 14, No. 6. – P. 660–678.
241. Utility of remote-sensing-based two-source energy balance model under low- and high-vegetation cover conditions / F. Li, W. P. Kustas, J. H. Prueger [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. – 2005. – Vol. 6, No. 6. – P. 878–891.
242. Vineyard irrigation scheduling based on airborne thermal imagery and water potential thresholds / J. Bellvert, P.J. Zarco-Tejada, J. Marsal [et al.] // *Australian Journal of Grape and Wine Research*. – 2016. – Vol. 22, No. 2. – P. 307–315.
243. Wagle P. et al. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 128. P. 192–203.
244. Wang, K. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climate variability / K. Wang, R. Dickinson // *Reviews of Geophysics*. 2012. (50). C. RG2005.
245. World Economic Forum. The Global Risks Report 2021. Geneva: WEF, 2021. 102 p.
246. Young, M.H. Large Weighing Lysimeters for Water and Deep Percolation Studies / M. H. Young, P. J. Wierenga, C. F. Mancino // *Soil Science*. – 1996. – Vol. 161, No. 8. – P. 491–502.
247. Yu, O. Y. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil / O. Y. Yu, B. Raichle, S. Sink // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. – 2013. – Vol. 4, No. 1. – P. 1–9.

248. Zeiliger A.M., Ermolaeva O.S. Informatsionnye tekhnologii v monitoringe bogarnykh i oroshaemykh agrotsenozov (Information technologies in monitoring of the bogarny and irrigated agrocenosis) // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016. Vol. 10–1, № 1. P. 62–66.
249. 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 Zavolgie Region of Russia / A. M. Zeyliger, O. S. Ermolaeva, V. V. Pchelkin // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – Art. 2601.
250. 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. Art. 1117.
251. Zeyliger, A. Spatial Interpolation of Gravimetric Soil Moisture Using EM38-mk Induction and Ensemble Machine Learning (Case Study from Dry Steppe Zone in Volgograd Region) / A. Zeyliger, A. V. Chinilin, O. Ermolaeva // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 16. – Art. 6153.
252. Zhang, K. A Review of Remote Sensing Based Actual Evapotranspiration Estimation / K. Zhang, J.S. Kimball, S.W. Running // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. – 2016. – Vol. 3, No. 6. – P. 834–853.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Картограммы 15 слоев геодатасета *ETav*, каждый из которых является суммой потоков *ETa8* за вегетационные периоды исследованного интервала 2003-2017 гг. представлены на рисунке А.1 в виде набора соответствующих картограмм, отображенных с использованием единой цветовой палитры.

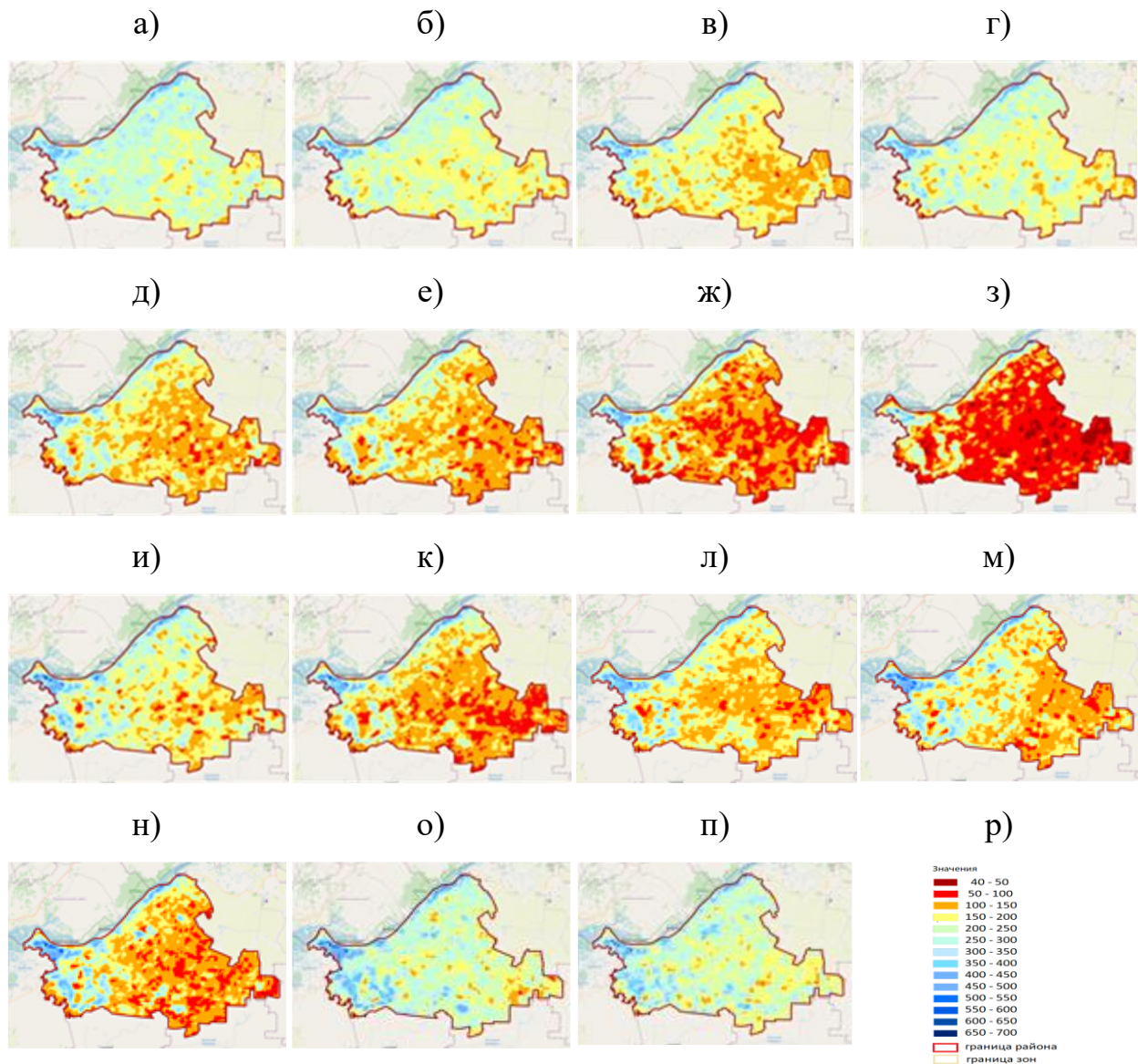


Рисунок А.1 – Набор картограмм слоев потоков *ETav* экстенда СТ-МР со 145-го календарного дня (25 мая) по 241-й день (2 сентября): а) 2003 г.; б) 2004 г.; в) 2005 г.; г) 2006 г.; д) 2007 г.; е) 2008 г.; ж) 2009 г.; и) 2010 г.; к) 2011 г.; л) 2012 г.; м) 2013 г.; н) 2014 г.; о) 2015 г.; п) 2016 г.; р) 2017 г.; т) легенда

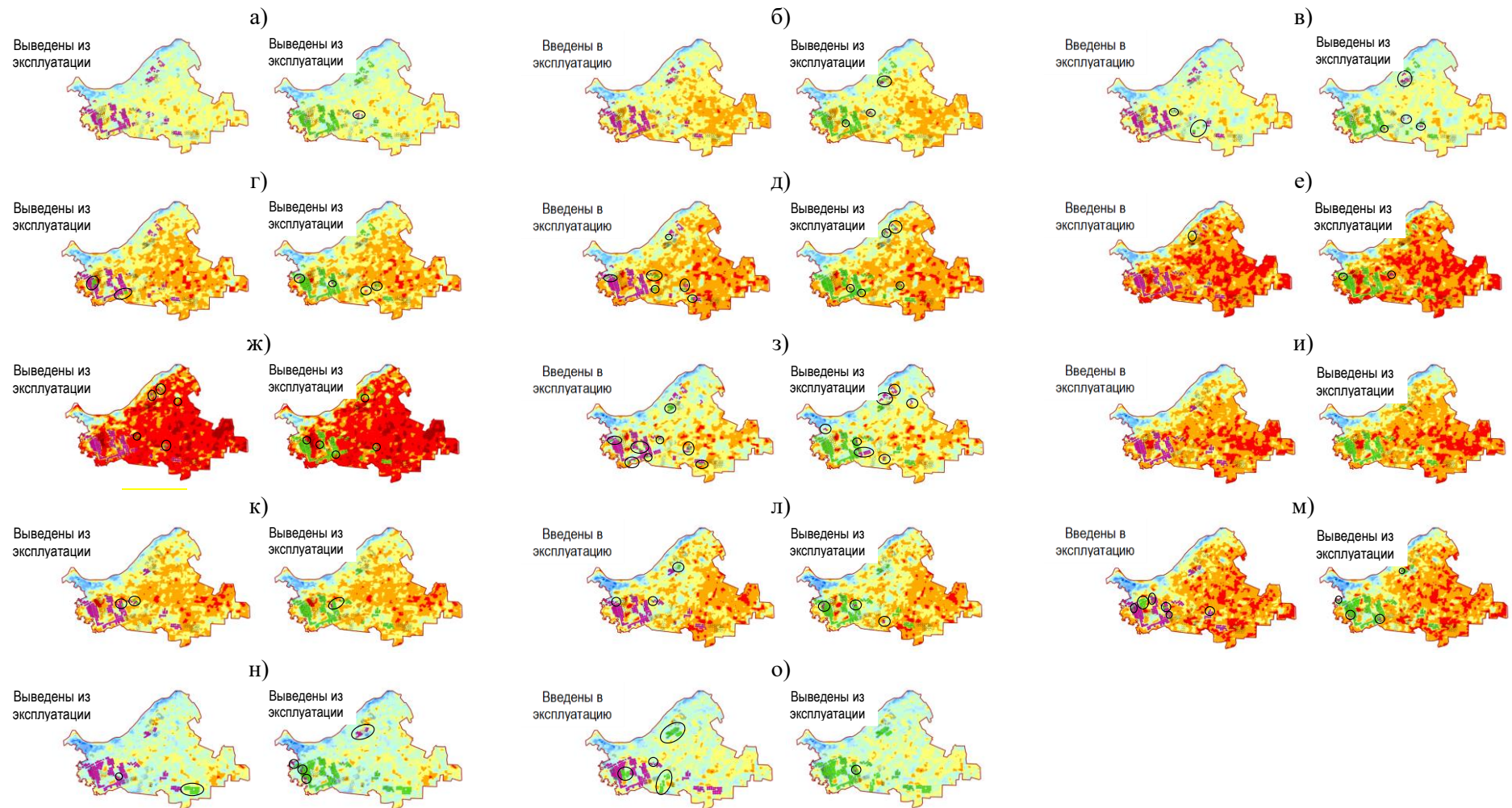


Рисунок А.2 – Межгодовое изменение инфраструктуры ДМ-КД на фоне картограмм *ETav* и маски обобщенного слоя ДМ-КД: а) 2003–2004 гг.; б) 2004–2005 гг.; в) 2005–2006 гг.; г) 2006–2007 гг.; д) 2007–2008 гг.; е) 2008–2009 гг.; ж) 2009–2010 гг.; и) 2010–2011 гг.; к) 2011–2012 гг.; л) 2012–2013 гг.; м) 2013–2014 гг.; н) 2014–2015 гг.; п) 2015–2016 гг.; р) 2016–2017 гг.

Описание горизонтов почвенного разреза на экспериментальном участке 2006–2009 г., расположенном на территории агрофирмы «Михайловское»
(Марковский район Саратовской области)

A₁ (0–19 см) – Суглинок темно–серый с буроватым оттенком, структура комковато-призматическая, по плотности – рыхлый к плотному, тонкопористый, мелкотрещиноватый, имеет химическое новообразование: выцветы хлоридов, кремнезем в виде мелкого SiO₂ и биологическое: отмершая корневая система и живая корневая система, от 10% соляной кислоты не вскипает, переход от горизонта резкий по плотности.

B₁ (19–32 см) – Глинистый грунт, сухой, темно–серый с буроватым оттенком, структура крупноглыбистая, очень плотный, тонкопористый, имеет мелкие вертикальные трещинки, химические новообразования: выцветы хлоридов, оглинение, железистые охристые мелкие пятна, биологические новообразования: живая корневая система, от 10% соляной кислоты не вскипает, переход от горизонта резкий к ясному.

B₂ (32–78 см) – Глинистый грунт, сухой, темноватобурый, структура крупно-комковато-призматическая, очень плотный, тонкопористый, имеет мелкие трещинки, горизонт очень слабо окрашен гумусовыми соединениями с 62 см встречаются выцветы карбонатов, включений нет, от 62 см вскипает бурно, переход от горизонта постепенный к заметному.

C_к (78–158 см) – Бурая карбонатная глина, карбонаты в виде черточек, прожилок, точек, пятен, гумус аккумулятивный иллювиальный солонцовый, имеет оглинение.

Таблица А.1 – Гранулометрический состав (в %) почвенного покрова экспериментального участка 2006–2009 гг., расположенного на территории агрофирмы «Михайловское» (Марксовский район Саратовской области)

Глубина, см	Размер почвенных частиц, мм						Содержание органического вещества, %
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	
5–15	5,46	39,1	19,31	12,15	13,62	10,36	3,9
15–25	4,42	33,47	29,35	7,68	8,33	16,75	2,5
25–35	3,85	35,22	27,34	8,89	10,58	14,12	1,2
35–45	3,47	35,64	23,73	11,76	13,92	11,48	0,41
45–55	3,32	35,95	27,61	11,05	11,87	10,20	0,09
55–65	3,10	36,92	23,77	12,60	11,86	11,75	-
65–75	3,42	45,65	19,72	8,83	8,14	14,24	-
75–85	3,40	41,34	23,88	6,21	12,22	12,95	-
85–95	5,97	42,06	30,81	5,09	10,26	5,81	-

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения 15 датасетов $ETav$ [мм] (2003–2017 гг.)

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экссесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	237	2820	53,1	231	520	114	0,8	1,1	199	231	269	Нет
2004	214	2699	52,0	205	536	111	1,5	4,0	180	205	237	Нет
2005	187	3576	59,8	172	540	85	1,8	4,6	148	172	207	Нет
2006	214	2974	54,5	205	545	97	1,4	3,3	179	205	236	Нет
2007	171	4083	63,9	156	568	65	1,7	4,0	130	156	192	Нет
2008	163	4432	66,7	144	500	56	1,6	2,7	118	144	188	Нет
2009	136	4806	69,3	115	580	37	2,2	6,0	96	115	149	Нет
2010	102	4112	64,1	83	607	18	2,4	7,9	65	83	114	Нет
2011	202	5239	72,4	188	635	58	1,4	2,9	154	188	234	Нет
2012	155	5487	74,1	133	634	55	2,0	5,1	109	133	174	Нет
2013	175	4920	70,1	157	584	54	1,9	4,3	131	157	194	Нет
2014	181	6165	78,5	161	622	47	1,8	4,0	129	161	207	Нет
2015	163	7219	85,0	137	656	38	1,9	4,0	110	137	180	Нет
2016	245	5193	72,1	234	612	80	1,1	2,0	200	234	275	Нет
2017	238	4163	64,5	226	574	80	1,0	1,5	193	226	271	Нет

Таблица Б.2 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения 15 производных датасетов *ETav* [мм] вида ЗП «лес» (2003–2017 гг.)

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экссесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	329	5320	73	327	520	164	0,13	-0,69	272	327	388	Да
2004	340	6063	78	342	536	167	0,11	-0,69	276	342	393	Да
2005	339	7575	87	339	540	136	0,12	-0,71	270	339	406	Да
2006	339	6735	82	341	545	163	-0,03	-0,67	278	341	401	Да
2007	328	8711	93	329	568	116	0,08	-0,48	253	329	396	Да
2008	307	7636	87	313	500	111	-0,10	-0,71	244	313	374	Да
2009	320	10901	104	325	580	95	0,03	-0,67	241	325	404	Да
2010	269	10962	105	257	607	50	0,65	0,24	191	257	335	Нет
2011	366	10349	102	363	635	116	0,11	-0,52	292	363	444	Да
2012	347	11916	109	346	634	118	0,08	-0,62	263	346	432	Да
2013	350	9342	97	353	584	115	-0,05	-0,67	275	353	423	Да
2014	376	12122	110	377	622	130	-0,06	-0,86	290	377	463	Да
2015	368	13394	116	370	656	115	-0,05	-0,72	276	370	460	Да
2016	392	9222	96	392	612	150	0,06	-0,69	316	392	467	Да
2017	360	7503	87	351	574	142	0,23	-0,62	297	351	425	Нет

Таблица Б.3 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения 15 производных датасетов *ETav* [мм] вида ЗП «пахотные земли» (2003–2017 гг.)

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экцесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	238	2288	47,8	236	409	114	0,18	-0,34	204	236	272	Нет
2004	210	1720	41,5	206	390	111	0,55	0,38	181	206	235	Нет
2005	179	2253	47,5	170	390	85	1,07	1,34	146	170	203	Нет
2006	212	1982	44,5	207	421	97	0,69	0,98	182	207	235	Нет
2007	166	2749	52,4	156	390	68	1,14	1,51	130	156	188	Нет
2008	159	3395	58,3	144	413	56	1,34	1,77	118	144	184	Нет
2009	128	2748	52,4	115	388	37	1,68	3,36	96	115	143	Нет
2010	94	2258	47,5	82	406	18	1,84	4,21	65	82	106	Нет
2011	197	3682	60,7	191	460	58	0,69	0,92	158	191	231	Нет
2012	145	3211	56,7	133	412	55	1,50	2,76	107	133	168	Нет
2013	169	3179	56,4	157	434	63	1,51	2,91	133	157	189	Нет
2014	173	4024	63,4	160	448	47	1,19	1,59	129	160	202	Нет
2015	155	5029	70,9	136	477	38	1,74	3,05	111	136	171	Нет
2016	240	4317	65,7	234	500	80	0,70	0,79	199	234	272	Нет
2017	236	3707	60,9	227	488	80	0,18	-0,34	194	227	270	Нет

Таблица Б.4 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения 15 производных датасетов $ETav$ [мм] вида ЗП «неиспользуемые земли» (2003–2017 гг.)

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экссесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	229	3352	58	215	427	139	0,80	-0,07	184	215	267	Да
2004	223	3647	60	203	417	128	0,65	-0,68	174	203	270	Нет
2005	206	4826	70	180	404	113	0,77	-0,48	147	180	260	Нет
2006	217	3952	63	198	412	119	0,61	-0,64	166	198	266	Нет
2007	185	5049	71	158	403	85	0,64	-0,78	123	158	246	Нет
2008	174	4608	68	144	372	87	0,80	-0,55	118	144	227	Нет
2009	157	5914	77	131	395	57	0,73	-0,56	91	131	214	Нет
2010	125	5055	71	99	351	32	0,82	-0,29	67	99	175	Нет
2011	210	7204	85	175	423	102	0,65	-0,85	138	175	277	Нет
2012	181	6941	83	147	424	70	0,73	-0,68	114	147	249	Нет
2013	190	6228	79	162	429	79	0,73	-0,46	127	162	248	Нет
2014	200	6259	79	181	430	82	0,67	-0,40	136	181	259	Нет
2015	182	7311	86	153	449	71	0,76	-0,35	108	153	248	Нет
2016	251	4389	66	238	437	135	0,59	-0,51	199	238	301	Нет
2017	241	3442	59	228	409	144	0,56	-0,63	192	228	282	Нет

Таблица Б.5 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения 15 производных датасетов *ETav* [мм] вида ЗП «другие сельскохозяйственные земли» (2003–2017 гг.)

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экссесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	225	2409	49	217	485	120	1,24	2,37	192	217	249	Нет
2004	209	2302	48	199	496	118	1,77	4,65	178	199	225	Нет
2005	184	2879	54	171	540	92	2,05	5,82	151	171	199	Нет
2006	204	2573	51	194	500	113	1,69	4,09	171	194	224	Нет
2007	165	3283	57	151	546	65	1,98	5,11	130	151	180	Нет
2008	155	3663	61	138	482	58	2,02	4,81	116	138	174	Нет
2009	130	4127	64	112	552	45	2,67	8,44	94	112	141	Нет
2010	99	3655	60	82	506	18	2,58	7,96	65	82	108	Нет
2011	191	4390	66	176	580	59	1,60	3,53	148	176	219	Нет
2012	150	4745	69	128	569	56	2,15	5,39	108	128	166	Нет
2013	166	4143	64	150	552	54	2,18	5,94	128	150	185	Нет
2014	173	5268	73	154	573	61	2,08	5,50	126	154	195	Нет
2015	154	6033	78	132	634	46	2,21	5,95	106	132	173	Нет
2016	240	3991	63	229	563	90	1,36	2,94	199	229	268	Нет
2017	227	2924	54	217	568	104	1,12	2,43	190	217	254	Нет

Таблица Б.6 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения скоростей трендов датасетов *ETav* четырех основных видов ЗП двух исследованных полупериодов 2003–2010 гг. и 2010–2017 гг.

Тип землепользования/ характеристики		Лес		Пахотные земли		Неиспользуемые земли		Другие сельскохозяйственные земли	
Полупериод, год		2003– 2010	2010– 2017	2003– 2010	2010– 2017	2003– 2010	2010– 2017	2003– 2010	2010– 2017
Среднее, М		-6,3	9,0	-18,1	15,3	-14,0	12,0	-16,7	14,3
Дисперсия, D		59,0	38,8	47,4	51,0	18,9	24,1	29,9	31,4
Стандартное отклонение, s		7,7	6,2	6,9	7,1	4,3	4,9	5,5	5,6
Медиана, Me		-7	9	-19	15	-15	13	-17	14
Максимум, Max		39	33	27	51	3	25	20	54
Минимум, Min		-27	-14	-41	-16	-26	-3	-37	-11
Асимметрия, A		3,64	1,55	2,63	2,13	0,99	-0,15	2,72	3,67
Эксцесс, E		1,02	-0,08	0,84	0,55	0,83	-0,39	0,87	0,64
Квартиль	1	-11	5	-22	11	-17	9	-20	11
	2	-7	9	-19	15	-15	13	-17	14
	3	-2	13	-15	19	-12	15	-14	17
Принадлежность к нормальной функции распределения		Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения скоростей трендов слоев датасета *ETav* орошаемых пахотных земель исследованного периода 2003–2017 гг.

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экцесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	289	1239	35	295	387	143	1,60	-0,85	270	295	313	Нет
2004	265	1578	40	266	368	165	-0,26	-0,20	241	266	293	Да
2005	257	2480	50	258	362	143	-0,79	-0,08	222	258	295	Да
2006	283	1569	40	282	384	204	-0,59	0,15	253	282	315	Да
2007	261	3024	55	273	360	128	-0,55	-0,65	228	273	304	Нет
2008	269	3369	58	280	390	126	-0,69	-0,47	226	280	316	Нет
2009	236	3491	59	247	368	83	-0,09	-0,57	203	247	279	Да
2010	192	2875	54	197	303	73	-0,43	-0,24	157	197	229	Да
2011	299	3431	59	301	440	119	0,39	-0,36	264	301	336	Нет
2012	261	3719	61	261	384	82	-0,28	-0,23	225	261	306	Да
2013	277	4308	66	287	402	121	-0,75	-0,41	235	287	330	Нет
2014	287	4675	68	299	433	97	-0,29	-0,56	242	299	340	Нет
2015	298	5554	75	310	456	115	-0,25	-0,58	259	310	353	Нет
2016	335	4495	67	348	462	124	0,17	-0,77	291	348	385	Да
2017	324	2748	52	331	426	127	1,63	-1,00	298	331	361	Нет

Таблица В.2 - Величины мер центральной тенденции и рассеяния, а также приближенная оценка соответствия нормальной функции распределения скоростей трендов слоев датасета *ETav* неорошаемых пахотных земель исследованного периода 2003–2017 гг.

Год	Среднее, М	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, s	Медиана, Me	Максимум, Max	Минимум, Min	Асимметрия, A	Экссесс, E	Квартиль			Принадлежность к нормальной функции распределения
									1	2	3	
2003	235	2132	46	233	396	114	-0,31	0,18	202	233	267	Нет
2004	206	1447	38	203	390	111	0,24	0,43	179	203	230	Нет
2005	174	1713	41	168	382	85	1,04	0,87	145	168	197	Нет
2006	207	1542	39	205	391	97	0,69	0,46	181	205	230	Нет
2007	158	1910	44	153	377	68	1,40	0,90	128	153	182	Нет
2008	150	2278	48	139	405	56	1,86	1,20	117	139	175	Нет
2009	119	1594	40	113	349	37	3,71	1,44	95	113	136	Нет
2010	86	1315	36	79	394	18	5,10	1,69	63	79	100	Нет
2011	190	2775	53	187	451	58	0,47	0,38	155	187	222	Нет
2012	137	2058	45	129	412	55	2,59	1,26	105	129	159	Нет
2013	160	1930	44	154	409	63	3,01	1,21	131	154	182	Нет
2014	163	2712	52	155	439	47	1,65	1,00	127	155	191	Нет
2015	142	2743	52	131	454	38	5,03	1,81	109	131	161	Нет
2016	230	3043	55	228	476	80	0,95	0,43	196	228	261	Нет
2017	226	2656	52	220	488	80	0,59	0,59	190	220	256	Нет

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024684252

**«Программа автоматической идентификации
орошаемых агроценозов по данным дистанционного
зондирования Земли с применением методов машинного
обучения»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет -
МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)*

Авторы: *Зейлигер Анатолий Михайлович (RU), Ермолаева
Ольга Сергеевна (RU), Греченева Анастасия Владимировна
(RU)*

Заявка № **2024683533**

Дата поступления **09 октября 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **16 октября 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Ю.С. Зубов**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023682426

**«Программа для расчета растровых слоев влажности
поверхностного слоя почвенного покрова»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет -
МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА
имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Ермолаева Ольга Сергеевна (RU), Зейлигер Анатолий
Михайлович (RU), Греченева Анастасия Владимировна (RU)*

Заявка № 2023681458

Дата поступления 18 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 октября 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2023621331

**«Пространственные характеристики потоков
суммарного испарения орошаемых и неорошаемых
агрофитоценозов с сельских территорий»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет -
МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА
имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Ермолаева Ольга Сергеевна (RU), Зейлигер Анатолий
Михайлович (RU)*

Заявка № 2023621052

Дата поступления 21 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 26 апреля 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Первый проректор - проректор по учебной работе ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

« 25 » сентября 2025 г.

о внедрении результатов диссертационной работы Ермолаевой О.С. «Региональные и зональные характеристики потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов Марковского района Саратовской области за 2003–2017 гг.»

- при постановке дисциплин «Анализ и визуализация многомерных сельскохозяйственных данных», «Инструменты искусственного интеллекта геоинформационных систем для АПК»;
- в рамках проведения научно-исследовательских работ, учебной и производственных практик, используются разработанные Ермолаевой О.С. модель базы геоданных, методы разметки и пространственно-временного анализа геоданных, полученных по данным дистанционного зондирования Земли;
- в рамках проведения практических занятий по дисциплинам «Анализ и визуализация многомерных сельскохозяйственных данных», «Инструменты искусственного интеллекта геоинформационных систем для АПК» использованы результаты научных исследований Ермолаевой О.С. по разработке базы геоданных и методике оценки региональных и зональных характеристик потока актуального суммарного испарения орошаемых и неорошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли.

 С.А. Захарова

И.А. Вахрушева

ент  А.В. Греченева

Архитектура систем искусственного интеллекта, к.т.н., доцент Гриц А.В. Греченева