

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**«Российский государственный аграрный университет– МСХА имени К. А.
Тимирязева»**

На правах рукописи

ИЧИТЕГЕТСЕ ИННОСЕНТ

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ В
АГРОКЛИМАТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ ИМБО РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ**

Специальность 4.1.5– Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент, профессор
Максимов Сергей Алексеевич

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОЦЕНКА И РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БУРУНДИ	15
1.1. Климат	15
1.2. Рельеф	18
1.3. Геологические условия	19
1.4. Гидрологические условия	20
1.5. Почвы в пределах ландшафтной катены реки Русизи	22
1.6. Природно-ресурсный потенциал региона Имбо	26
1.7. Агроклиматическое районирование территории Республики Бурунди	28
Выводы к главе 1	29
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРОШЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ	31
2.1. Ресурсная обеспеченность и территориальное распределение орошения	31
2.2. Проблемы и ограничения орошаемого земледелия в Республике Бурунди	33
2.3. Технологии орошения и продуктивность кукурузы в тропических условиях	34
2.3.1. Физиологические особенности водопотребления и продуктивности кукурузы в тропическом климате	36
2.3.2. Ресурсосберегающие технологии орошения кукурузы	37
2.4. Технологический уровень возделывания кукурузы в Бурунди	37
2.5. Индикативная оценка потенциальной продуктивности кукурузы по радиационному балансу с учетом технологического уровня возделывания	38

Выводы к главе 2: современное состояние, ограничения и научная проблема исследования	42
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ОБОСНОВАНИЕ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НОРМ В УСЛОВИЯХ БУРУНДИ .	44
3.1. Метеорологические наблюдения и данные реанализа AgERA5: характеристика исходных данных	44
3.2. Методика сопоставления данных реанализа AgERA5 и метеорологических наблюдений	46
3.3. Сопоставление данных реанализа спутника AgERA5 и данных фактических наблюдений на метеостанциях.....	52
3.4. Климатические тренды и детальная оценка расхождений AgERA5 с данными метеостанции Бужумбура	52
3.5. Оценка возможности использования данных реанализа AgERA5 для расчёта режимов орошения	57
Выводы к главе 3	58
ГЛАВА 4. РАСЧЁТ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ В УСЛОВИЯХ РЕГИОНА ИМБО РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ ПО МЕТОДИКЕ ФАО	60
4.1. Последовательность расчёта режима орошения по FAO CROPWAT 8.060	
4.2. Параметризация расчёта для природных условий трех фаций ландшафтной катены реки Русизи в Регионе Имбо	63
4.3. Результаты расчёта водопотребления и режимов орошения по типам почв	69
4.4. Практические рекомендации по проектированию режима орошения кукурузы	76
Выводы по главе 4	78
ГЛАВА 5. РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА А.И. ГОЛОВАНОВА	80

5.1. Обоснование выбора и теоретические основы модели А.И. Голованова	80
5.2. Параметризация модели для трёх расчётных участков ландшафтной катены	86
5.3. Результаты расчёта режима орошения кукурузы по трём участкам	90
5.4. Водообмен по участкам катены по модели А.И. Голованова	93
Выводы к главе 5	94
ГЛАВА 6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ ПО МЕТОДИКЕ FAO CROPWAT 8.0 И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА А.И. ГОЛОВАНОВА.....	
6.1. Сводные результаты расчёта оросительных норм по двум независимым методам.....	96
6.2. Физическое и методическое обоснование выявленных расхождений.	97
6.3. Дифференциация расчетных оросительных норм при поливе кукурузы для трех фаций в пределах ландшафтной по катены реки Русизи	98
6.4. Расчёты оросительных норм и режима орошения кукурузы для года 75% обеспеченности в составе многолетних прогнозных расчетов (по данным многолетнего ряда наблюдений с 1997 по 2016 гг.)	100
6.5. Практическое значение установленных особенностей применения методов	101
Выводы к главе 6	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	105
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	115
ПРИЛОЖЕНИЯ	130
Приложение А. Годовые суммы осадков, испаряемости и дефицита влажности за период 1997–2016 гг. и обеспеченность метеорологических условий.....	130

Приложение Б. Ретроспективный расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги) 132

Приложение В. Многолетний анализ элементов водного баланса по Голованову (1997–2016 гг.) 138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований.

Кукуруза остаётся важнейшей продовольственной культурой Республики Бурунди. По данным обследования 164 сельских домохозяйств, она занимает 33,9% посевных площадей, за ней следуют маниока (26,5%) и фасоль (14,4%); сельским хозяйством занято 98,8% опрошенных [118]. Сельское хозяйство страны в целом обеспечивает более 30% ВВП и занятость свыше 85% активного населения [122]. Устойчивая зависимость аграрного сектора от богарного, неорошаемого земледелия остаётся при этом одной из главных причин продовольственной необеспеченности: по имеющимся оценкам, около 1,8 млн человек в стране живут под риском острого дефицита продовольствия из-за низкой и нестабильной урожайности [112].

Из 123 тыс. га потенциально пригодных для орошения земель фактически орошается лишь треть, около 33%. Более 80% этих площадей сосредоточено в агромелиоративном регионе Имбо, аллювиальной равнине вдоль реки Русизи и озера Танганьика, где сочетаются доступные водные ресурсы и пригодные для орошения почвы. Тем не менее системного научного анализа режимов орошения кукурузы с учётом почвенной неоднородности ландшафтной катены этого региона до сих пор не проводилось. Похожая картина характерна и для стран Африки южнее Сахары в целом: зависимость от богарного земледелия там столь же велика, а научно обоснованные системы орошения развиты слабо [58].

Развитие гидромелиоративной инфраструктуры считается одним из ключевых механизмов повышения доходов сельских домохозяйств и стабилизации аграрного производства. Однако оросительные системы региона сегодня страдают от дефицита инфраструктуры и слабого эксплуатационного управления [123]. В этих условиях оптимизация самого режима орошения остаётся одним из немногих доступных рычагов повышения продуктивности кукурузы, не требующих строительства новой инфраструктуры и не создающих дополнительной нагрузки на и без того ограниченные водные ресурсы региона.

Расчётные методы и модели орошения применялись для отдельных условий тропической и субтропической Африки и раньше. Но систематического сопоставления таких методов, тем более расчётов подобного рода непосредственно для природных условий Бурунди, до настоящей работы не проводилось. Расчёты режима орошения кукурузы для условий агромелиоративного региона Имбо выполнены впервые. Их результаты могут быть использованы при разработке практических рекомендаций по орошению с учётом местных природных условий, что способствует устойчивому развитию орошаемого земледелия в Республике Бурунди и укреплению продовольственной безопасности страны.

Степень разработанности темы.

Основы мелиоративной науки заложены А.Н. Костяковым [25]. Дальнейшее развитие она получила в трудах А.Д. Брудасова [3], С.Ф. Аверьянова [1], В.В. Ведерникова [4], В.А. Ковды [21, 22, 23], Б.С. Маслова [32], Б.А. и Б.Б. Шумаковых [45, 46], Б.М. Кизяева [19], И.П. Айдарова [2], А.И. Голованова [5, 6, 7, 8, 9], В.В. Шабанова [40, 41, 42], Ю.П. Добрачёва [12], Н.Н. Дубенка [13], Л.М. Рекса [38], Н.М. Решёткиной [39], Л.В. Кирейчевой [20], И.П. Кружилина [27], С.Д. Исаевой [14], А.П. Лихацевича [28], В.П. Максименко [30], Ю.Н. Никольского [35], Б.Ф. Никитенкова [34], В.Н. Краснощёкова [26], С.А. Максимова [31] и др. Вопросам мелиорации и орошения в Бурунди посвящены работы Clément Mathieu [109], В.В. Шабанова, J. Doorenbos, W.O. Pruitt [76, 77], R.A. Feddes [81], P.G. Jarvis [99], M.A. Celia [65], Nestor Niyonzima [33, 43, 44], Prosper Manirakiza [108].

Обзор литературы показывает, что исследования по Бурунди касались в основном общих агрономических аспектов выращивания кукурузы: технологий возделывания и их влияния на урожайность. Собственно, режимы орошения сельскохозяйственных культур в стране изучены слабо, хотя именно взаимодействие ирригационных систем, почвенных характеристик и местного климата определяет возможности оптимизации производства кукурузы в этих регионах.

Такая же ограниченность исследований по режимам орошения свойственна и соседним странам региона. Даже в работах, посвящённых развитию орошения в

Африке южнее Сахары, отмечается, что научно обоснованные методики расчёта применяются нечасто, а само орошаемое земледелие сталкивается с инфраструктурными и управленческими проблемами: недостаточным техническим обслуживанием систем и барьерами для внедрения водосберегающих технологий [55, 95]. Опыт общинного управления оросительными системами в Буркина-Фасо показывает, что их устойчивость ограничена слабым эксплуатационным менеджментом после передачи управления местным фермерским организациям [55]. Похожая проблема возникает и при внедрении дождевальных машин кругового действия в общинных ирригационных схемах Руанды, где успех зависит от согласованного учёта водных и энергетических ресурсов [66]. Фрагментарность исследований по режимам орошения непосредственно в условиях Бурунди и обуславливает научную новизну настоящей работы.

Применение современных расчётных инструментов для обоснования режимов орошения в этой ситуации методически оправдано. Среди наиболее известных моделей, реализованных как программы для расчёта режима орошения, можно выделить программный комплекс FAO CROPWAT 8.0 с базой данных CLIMWAT 2.0, AquaCrop [129], SIMdualKc, DSSAT, а также математическую модель влагопереноса А.И. Голованова, реализованную в программе «Полив». В настоящей работе применены две из них: FAO CROPWAT 8.0 и модель влагопереноса А.И. Голованова. Модель CROPWAT широко используется для обоснования режимов орошения в условиях ограниченной гидрометеорологической изученности, в том числе в Египте [83], Пакистане [96] и других странах со сходным дефицитом данных [136], что подтверждает методическую состоятельность её применения и для условий Бурунди. Физически обоснованные модели влагопереноса, к которым относится модель Голованова, используются в исследованиях по странам Африки южнее Сахары заметно реже, чем балансовые модели типа CROPWAT [47, 87], а значит их сопоставление применительно к условиям региона Имбо имеет самостоятельную научную ценность.

Сеть метеорологических станций Бурунди фрагментарна: имеющиеся ряды наблюдений содержат существенные пропуски и не дают непрерывного многолетнего покрытия, необходимого для обоснования режимов орошения. Данные реанализа AgERA5, обеспечивающие пространственно и во времени непрерывный ряд климатических показателей, в этой ситуации выглядят разумным решением проблемы. Но использовать их напрямую нельзя: сначала нужна верификация и установление поправочных коэффициентов относительно данных наземных наблюдений.

Расчёт режима орошения с использованием математических моделей требует параметризации: климатических, почвенных, геологических, гидрогеологических, фенологических параметров. На ландшафтной катене у реки Русизи в регионе Имбо можно выделить три характерные фации (фация, по Б.Б. Польшову [37], – элементарная геохимически однородная единица ландшафта, приуроченная к одной форме рельефа, одной почвообразующей породе и одному биоценозу): супераквальную, на пойменной части левого берега реки, трансаллювиальную, переходную, и аллювиальную, расположенную на первой пойменной террасе. Каждой фации соответствует свой генетический тип почв. На супераквальной фации – это солончаки глеевые (Solonchaks Gleyic, SCgl) при глубине залегания грунтовых вод около 0,8 м. На трансаллювиальной, при глубине грунтовых вод 2,5 м, это глейсоли молликовые (Gleysols Mollic, GLmo). На первой надпойменной террасе, где грунтовые воды залегают глубже 7 м, это камбисоли дистрические (Cambisols Dystric, CMdy). Гидрофизические свойства этих почв различны, и без учёта этого различия обосновать режим орошения кукурузы корректно не получится.

Объект исследования. Агроклиматический регион Имбо, аллювиальная равнина в западной части Республики Бурунди (775–1000 м над уровнем моря). Три расчётных участка по ландшафтной катене реки Русизи (фации выделены по Б.Б. Польшову [37]): участок I, солончаки глеевые (Solonchaks Gleyic, SCgl), глубина залегания грунтовых вод около 0,8 м; участок II, глейсоли молликовые (Gleysols

Mollic, GLmo), глубина грунтовых вод около 2,5 м; участок III, камбисоли дистрические (Cambisols Dystric, CMdy), глубина грунтовых вод более 7 м.

Предмет исследований. Режимы орошения кукурузы: оросительные нормы, число и нормы поливов, межполивные периоды с учётом типов почв, климатических данных и биологических параметров культуры.

Цель исследований– научное обоснование дифференцированных режимов орошения кукурузы для трёх характерных участков ландшафтной катены агромелиоративного региона Имбо с учётом типов почв, данных реанализа и изменения климата.

Для достижения цели решались **следующие задачи**:

1. Оценить природно-климатические условия агромелиоративного региона Имбо на основе данных метеостанции Бужумбура (1991–2020 гг.) и реанализа AgERA5.
2. Обосновать применимость реанализа AgERA5 для расчёта режимов орошения в Республике Бурунди и установить поправочные коэффициенты.
3. Оценить влияние наблюдаемых тенденций изменения климата на режимы орошения кукурузы.
4. Рассчитать дифференцированные режимы орошения кукурузы методом FAO CROPWAT 8.0 для трёх типов почв катены.
5. Осуществить параметризацию математической модели влагопереноса А.И. Голованова и выполнить расчёт режимов орошения кукурузы с учётом динамики грунтовых вод и особенностей водообмена между корнеобитаемым слоем почвы и подстилающими горизонтами.
6. Провести сравнение результатов расчёта режимов орошения кукурузы по методике FAO CROPWAT 8.0 и математической модели влагопереноса А.И. Голованова для трёх типов почв ландшафтной катены региона Имбо и оценить достоверность и особенности их применения.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны дифференцированные режимы орошения кукурузы для трёх типов почв ландшафтной катены р. Русизи двумя независимыми методами: FAO CROPWAT 8.0 и математической моделью влагопереноса А.И. Голованова.
2. Установлены расхождения между методами, различные по величине и знаку: +1,3% на участке I (солончаки), -11,4% на участке II (глейсоли, где модель Голованова даёт меньшую норму за счёт учёта капиллярного подпитывания), +2,9% на участке III (камбисоли, где методы сходятся при глубоком залегании грунтовых вод). Картина расхождений обоснована различием концептуальных постановок задачи в двух моделях.
3. Впервые проведён сравнительный анализ данных реанализа AgERA5 и наблюдений метеостанции Бужумбура за 1991–2020 гг.; установлены систематические расхождения по ключевым климатическим параметрам и обоснованы поправочные коэффициенты для применения реанализа при проектировании режимов орошения в Бурунди.

Теоретическая значимость работы состоит в научно-методическом обосновании применения и сопоставления двух расчётных подходов для условий тропического орошаемого земледелия, а также в выявлении границ применимости модели CROPWAT 8.0 и модели влагопереноса А.И. Голованова применительно к специфическим гидрологическим условиям почв ландшафтной катены.

Практическая значимость определяется разработкой конкретных норм и режимов орошения кукурузы, дифференцированных по трём типам почв региона Имбо. Эти данные могут быть использованы при проектировании ирригационных систем, разработке агромелиоративных рекомендаций и планировании водопользования в Республике Бурунди.

Методология и методы исследований базируются на системном подходе и фундаментальных положениях мелиоративной науки. Ландшафты при этом рассматриваются как открытые иерархические системы из взаимосвязанных

компонентов природы, развивающихся как единое целое, что определяет выбор системного и географического подходов к построению моделей.

В работе применены: метод Пенмана-Монтейта для расчёта эталонной эвапотранспирации (FAO-56); программный комплекс CROPWAT 8.0 с базой данных CLIMWAT 2.0 для моделирования водопотребления и разработки режимов орошения; математическая модель влагопереноса А.И. Голованова (1975), программа «Полив», для численного решения уравнения Ричардса с учётом капиллярной подпитки из грунтовых вод. Многолетние прогнозные расчёты выполнены по данным реанализа AgERA5 и метеостанции Бужумбура (3,32° ю.ш., 29,32° в.д., 783 м над уровнем моря) за 1991–2020 гг. Эффективные осадки определялись по методу USDA Soil Conservation Service. Использованы данные геотехнических изысканий Министерства сельского хозяйства Республики Бурунди.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дифференцированные режимы орошения кукурузы для трёх типов почв региона Имбо, разработанные на основе модели FAO CROPWAT 8.0.
2. Результаты моделирования водного режима почв и режимов орошения кукурузы по математической модели влагопереноса А.И. Голованова с учётом капиллярной подпитки из грунтовых вод.
3. Сравнительный анализ результатов расчёта оросительных норм кукурузы по катене р. Русизи в моделях FAO CROPWAT 8.0 и «ПОЛИВ» А.И. Голованова.
4. Оценка влияния изменения климата на режимы орошения кукурузы в регионе Имбо по данным реанализа AgERA5 и наблюдений метеостанции Бужумбура.

Степень достоверности результатов подтверждается применением верифицированных расчётных моделей (CROPWAT 8.0, модель А.И. Голованова), использованием 30-летнего ряда климатических наблюдений, соответствием полученных значений водопотребления кукурузы (434,8 мм по CROPWAT 8.0) литературным данным для аналогичных тропических условий, а также взаимной

согласованностью двух независимых методик для участков I и III, солончаков глеевых и камбисолей дистрических, где расхождение результатов не превышает 1,3–2,9%.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на расширенном заседании кафедры сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, а также представлены на трёх международных научных конференциях:

1. Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (05–07 июня 2023 г., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва).
2. Международный форум молодых учёных «Мелиорация будущего: тренды, инновации и технологии в сельском хозяйстве», посвящённый 100-летию образования ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (28–29 марта 2024 г., Москва).
3. Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии (02–04 июня 2025 г., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва).

Личный вклад автора заключается в подготовке и обработке данных, выполнении и анализе результатов расчёта, написании статей, автореферата, текста диссертации, презентации и доклада.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, и 3 публикации в материалах международных конференций.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация изложена на 147 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 31 рисунок, 20 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 151 наименование, в том числе 105 – на иностранном языке и 4 приложений.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, доктору технических наук, профессору, заведующему отделом мелиорации земель ФГБНУ ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова Максимова

Сергею Алексеевичу за постоянное внимание к работе, ценные консультации и методическую поддержку на всех этапах исследования. Отдельная благодарность кандидатам технических наук Головинову Евгению Эдуардовичу и Корнееву Илье Викторовичу за консультации и замечания, способствовавшие улучшению работы, а также преподавателям и аспирантам кафедры сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и сотрудникам ФГБНУ ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова за конструктивное обсуждение результатов исследования. Искренняя признательность сотрудникам Географического института Бурунди (IGEBU), Института сельскохозяйственных наук Бурунди (ISABU) и Министерства окружающей среды, сельского хозяйства и животноводства Республики Бурунди за предоставленные метеорологические и почвенные данные, использованные при выполнении настоящего исследования.

ГЛАВА 1. ОЦЕНКА И РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БУРУНДИ

Равнина Имбо, объект настоящего исследования, сложена речными наносами в западной части Африканской рифтовой долины и расположена на высоте 775–1000 м над уровнем моря, самой низкой части Бурунди. Равнина включает долину реки Русизи (шириной от 4–10 км на севере до 25 км на юге) и прибрежные территории озера Танганьика.

Жаркий тропический климат на Равнине Имбо с выраженной сезонностью осадков заметно отличается от остальной территории страны: среднегодовая температура достигает 23–24°C, годовое количество осадков составляет около 800 мм.

Ценность региона для сельского хозяйства определяется богатыми речными наносами, которые формируют плодородные почвы: в бассейне реки Русизи преобладают чёрные тропические почвы, поддерживающие разнообразное сельское хозяйство, включая возделывание кукурузы.

1.1. Климат

Климат Бурунди отличается выраженной сезонностью, связанной с разнообразием рельефа страны: от аллювиальных равнин у озера Танганьика до возвышенностей Конго-Нильского хребта. На территории страны выделяется пять агроклиматических зон с бимодальным режимом осадков: два сезона дождей (март–май и сентябрь–ноябрь) и два сухих сезона (июнь–август и декабрь–февраль). Поскольку объектом настоящего исследования является равнина Имбо, ниже климатические параметры приводятся прежде всего для этого региона по данным метеостанции Бужумбура; сведения по остальным агроклиматическим зонам страны используются только для сопоставления при агроклиматическом районировании.

Среднегодовое количество осадков в Бурунди составляет около 1170 мм, но по территории оно варьирует существенно. В регионе Имбо среднегодовое количество осадков заметно ниже, около 800 мм, и при выраженной сезонности это

определяет высокую потребность в орошении в течение сухого сезона. Самые влажные месяцы совпадают с длинным сезоном дождей, благоприятствующим росту кукурузы, бобов и маниоки. Засушливые периоды, напротив, могут вызывать нехватку воды и снижение урожайности, особенно при богарном земледелии.

Среднегодовая температура в Бурунди составляет около 19,1°C и сильно варьирует в зависимости от высоты над уровнем моря. На равнине Имбо она держится на уровне 23–24°C – самое высокое значение среди агроклиматических зон страны. Это определяет повышенную эвапотранспирацию и, соответственно, интенсивную потребность сельскохозяйственных культур в воде. Среднемесячные значения температуры воздуха по данным метеостанции Бужумбура приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Среднемесячные температуры в Бужумбуре (равнина Имбо)

Месяц	Минимальная температура, °C	Максимальная температура, °C	Средняя температура, °C
Январь	19,1	29,1	24,1
Февраль	19,1	29,4	24,3
Март	19,2	29,3	24,3
Апрель	19,5	29,2	24,4
Май	19,1	29,3	24,2
Июнь	17,5	29,4	23,5
Июль	16,4	29,2	22,8
Август	17,3	30,0	23,7
Сентябрь	18,5	30,7	24,6
Октябрь	18,9	30,1	24,5
Ноябрь	18,9	28,8	23,9
Декабрь	19,0	28,8	23,9
Среднее	18,5	29,4	24,0

Более высокие температуры равнины Имбо позволяют выращивать теплолюбивые культуры, в том числе кукурузу, что и определяет сельскохозяйственный потенциал региона.

Находясь вблизи экватора, Бурунди получает значительное количество солнечной радиации в течение года; среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет около 6,1 часа в сутки. Максимум радиации приходится на сухой сезон (июнь–сентябрь), минимум – на сезон дождей из-за облачности. Среднемесячные значения продолжительности солнечного сияния и радиации приведены в таблице 1.2.

Высокий уровень инсоляции создаёт благоприятные условия для фотосинтеза и роста растений. Но в засушливые периоды то же интенсивное солнечное излучение усиливает эвапотранспирацию и увеличивает потребность в орошении.

Таблица 1.2 – Среднемесячная продолжительность солнечного сияния и радиация в Бужумбуре

Месяц	Солнечное сияние, ч	Радиация, МДж/м ² /день
Январь	5,2	17,3
Февраль	5,2	17,7
Март	5,5	18,2
Апрель	5,3	17,0
Май	6,2	17,2
Июнь	7,6	18,4
Июль	8,2	19,5
Август	7,6	19,8
Сентябрь	6,7	19,5
Октябрь	5,6	18,3
Ноябрь	4,9	16,8
Декабрь	5,0	16,8
Среднее	6,1	18,0

Ветровой режим Бурунди также подчинён сезонным вариациям: скорость ветра выше в сухой сезон и ниже в сезон дождей. Средняя скорость ветра

составляет около 4,3 м/с, с максимумом в сентябре (5,3 м/с) и минимумом в январе (3,3 м/с). Среднемесячные значения скорости ветра приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Среднемесячная скорость ветра в Бужумбуре

Месяц	Скорость ветра, км/день	Скорость ветра, м/с
Январь	285	3,3
Февраль	346	4,0
Март	311	3,6
Апрель	346	4,0
Май	363	4,2
Июнь	397	4,6
Июль	423	4,9
Август	441	5,1
Сентябрь	458	5,3
Октябрь	389	4,5
Ноябрь	328	3,8
Декабрь	328	3,8
Среднее	368	4,3

Ветер напрямую влияет на скорость эвапотранспирации и, значит, на потребность растений в воде: в засушливые периоды сильные ветры усиливают испарение с поверхности почвы.

Максимальные значения эвапотранспирации (5,40–6,88 мм/сут) приходятся именно на сухой сезон (июнь–сентябрь), что и обосновывает необходимость интенсивного орошения кукурузы в этот период; в периоды высокой температуры и низкого количества осадков кукуруза может потреблять до 60 мм воды в неделю.

1.2. Рельеф

Рельеф Бурунди характеризуется значительными перепадами высот, формирующими отдельные географические регионы, что и определяет распределение агроклиматических зон страны (рисунок 1.1).

Западная низменность, в частности регион Имбо, имеет выраженный низкий топографический профиль: высота над уровнем моря составляет здесь в среднем около 800 м, а в пределах долины Русизи и равнины Имбо снижается примерно до 700 м – это одна из самых низких местностей Бурунди.

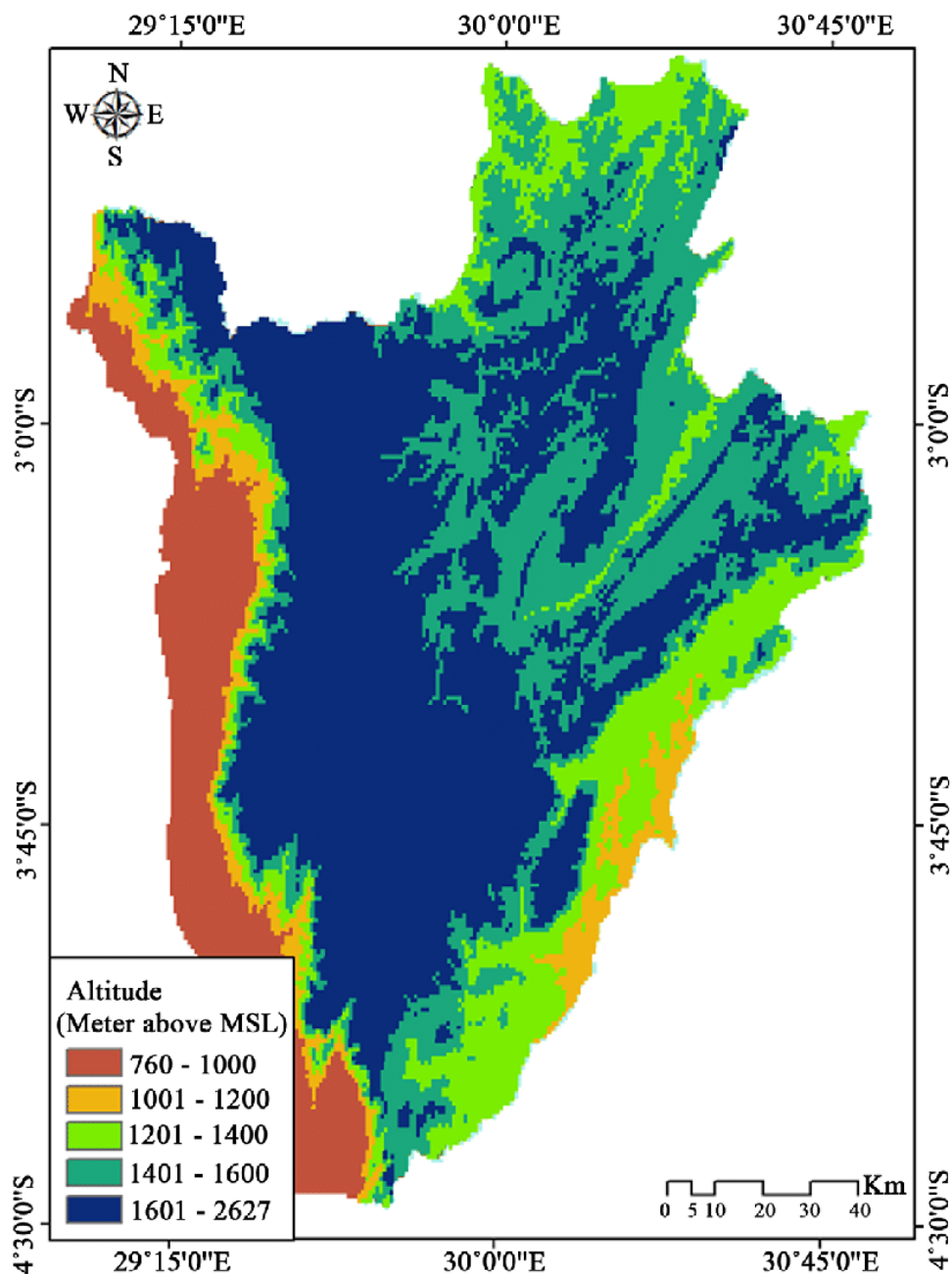


Рисунок 1.1 – Рельеф местности Бурунди.

1.3. Геологические условия

Геологическая структура Бурунди определяется докембрийскими формациями мезопротерозойской системы пояса Кибаран (рисунок 1.2) [60].

Сложная геологическая история обусловила разнообразие почвенных профилей и минеральных ресурсов страны. В центральных регионах плодородные почвы формируются под влиянием формаций Кибаранского пояса, а аллювиальные отложения создали продуктивные сельскохозяйственные зоны в днищах долин. Тектонические особенности сформировали структуру дренажа ландшафта, а геологические разрывы играют существенную роль в распределении грунтовых вод – это имеет прямое отношение и к почвенно-гидрологическим условиям катены р. Русизи.

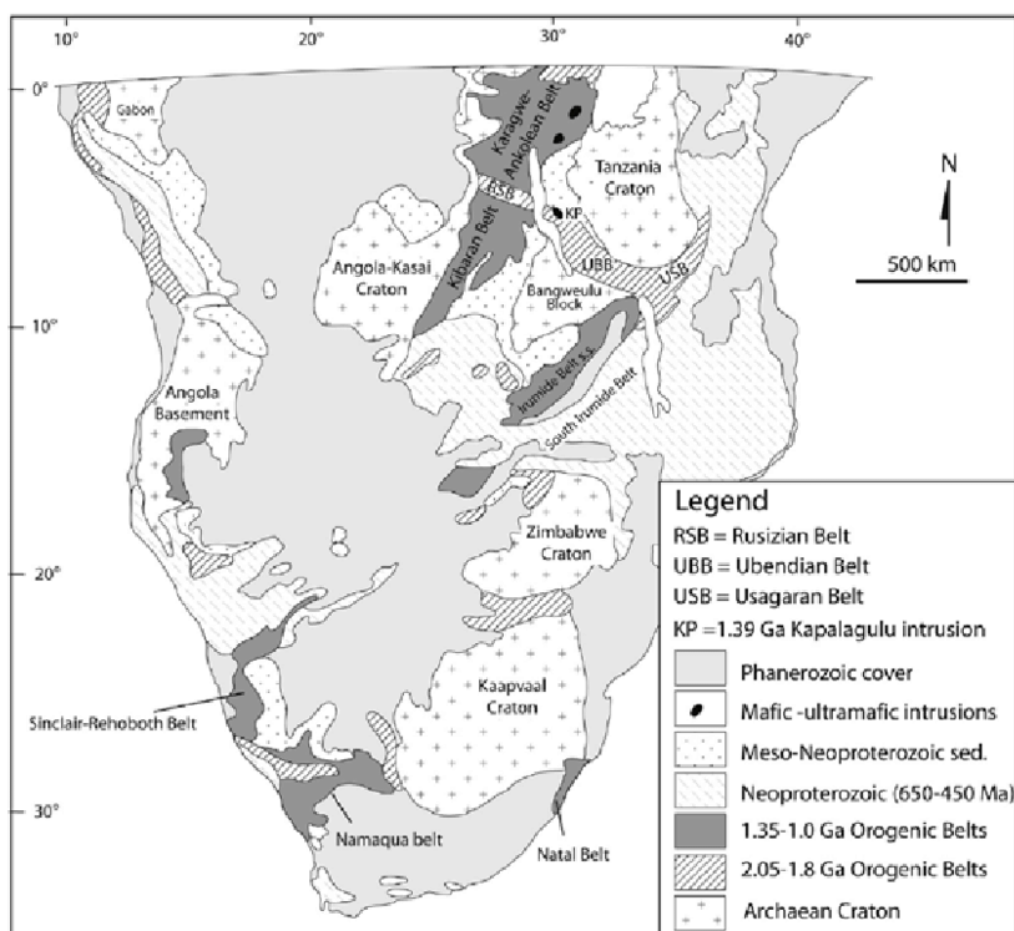


Рисунок 1.2 – Пояс Кибара и важные протерозойские орогены в Южной Африке [60].

1.4. Гидрологические условия

Гидрография Бурунди определяется сетью рек и озёр, играющих важную роль в сельскохозяйственной деятельности страны (рисунок 1.3) [87]. Гидрологический ландшафт формируется положением страны в верховьях бассейнов рек Конго и Нил, разделённых Конго-Нильским водоразделом.

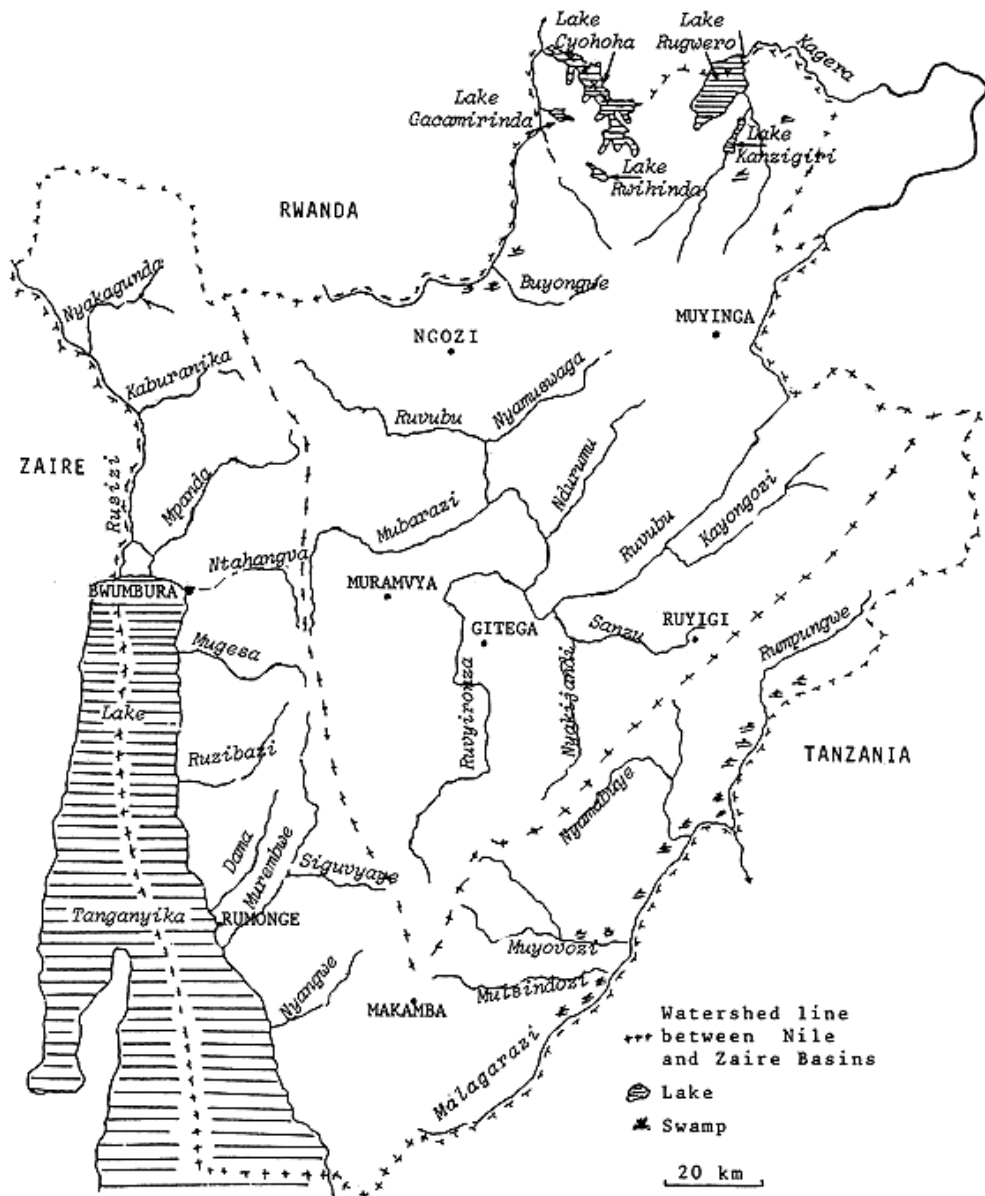


Рисунок 1.3 – Гидрография Бурунди (адаптировано из источника [87]).

Река Русизи берёт начало из озера Киву в Демократической Республике Конго, протекает через Бурунди на высоте 1462 м над уровнем моря и впадает в озеро Танганьика, образуя западную границу региона Имбо между Бурунди и ДРК. Река служит ключевой гидрологической артерией региона: именно вдоль неё сформировалась ландшафтная катена, на которой расположены расчётные участки настоящего исследования.

Гидрологическая сеть региона обеспечивает воду для орошения кукурузы, риса и овощей. Сезонные колебания речного стока, особенно в сезон дождей, существенно влияют на сельскохозяйственный цикл, поэтому управление водными ресурсами остаётся одним из ключевых вопросов устойчивого развития региона.

Гидрогеологические условия региона Имбо изучены картографически: составлены карты потенциала подземных вод в кристаллическом фундаменте тропической зоны [57] и почвенно-растительные карты территории [61, 62], а для отдельных водосборов региона (в частности, для бассейна Ньянзари в провинции Гитега) выполнена детальная оценка уязвимости грунтовых вод [91]. Эти материалы подтверждают неоднородность гидрогеологических условий региона и согласуются с принятой в настоящей работе дифференциацией расчётных участков по глубине залегания грунтовых вод.

1.5. Почвы в пределах ландшафтной катены реки Русизи

В бассейне реки Русизи преобладают чёрные тропические почвы, которые поддерживают разнообразную сельскохозяйственную деятельность и хорошо удерживают воду – благоприятное качество для орошаемого земледелия. В пределах этой общей характеристики выделяются описанные ниже три типа почв ландшафтной катены (солончаки глеевые, глейсоли молликовые, камбисоли дистрические), различающиеся конкретными водно-физическими свойствами.

Солончаки глеевые, глейсоли молликовые и камбисоли дистрические – три типа почв, характерных для расчётных участков I, II и III ландшафтной катены реки Русизи. Их гидрологическое поведение и требования к управлению орошением определяются прежде всего различной педогенетической историей, от которой зависят влагоудерживающая способность, водопроницаемость и характер переноса растворённых веществ. По сути, это разные звенья одного ряда почвообразования, сформированные под влиянием климата, рельефа, почвообразующих пород и времени [146, 76].

Эффективное орошение на таких почвах требует точного понимания их структурных и химических ограничений – иначе не избежать вторичного засоления, переувлажнения или вымывания элементов питания [48, 92].

Солончаки глеевые (участок I, глубина залегания грунтовых вод около 0,8 м) формируются в бессточных озёрных депрессиях либо на территориях с высоким уровнем грунтовых вод [145]. Для них характерно накопление растворимых солей, преимущественно хлоридов, и признаки оглеения, возникающие из-за длительного

переувлажнения и анаэробных условий: профиль приобретает сероватую окраску с редоксиморфными пятнами [140]. Высокое содержание солей заметно меняет физическую структуру почвы – ионы натрия вызывают пептизацию глинистых частиц, что разрушает почвенные агрегаты и снижает водопроницаемость [104]. Как следствие, солончаки глеевые отличаются низкой инфильтрационной способностью, слабым дренажом и повышенным риском поверхностного застоя воды при орошении [92].

Глейсоли молликовые (участок II, глубина залегания грунтовых вод около 2,5 м) отличаются тёмным, богатым основаниями гумусовым горизонтом с высоким содержанием органического вещества в сочетании с признаками оглеения, которые возникают при постоянном или периодическом переувлажнении [76, 107]. Такие почвы типичны для пойменных территорий с неглубоким залеганием грунтовых вод и восстановительными условиями [140, 115]. Высокое содержание органического вещества повышает ёмкость катионного обмена и влагоудерживающую способность почвы, однако оглеенный подпахотный горизонт, как правило, слабоводопроницаем из-за уплотнения или накопления глинистых минералов [102]. Сочетание высокой влагоёмкости с ограниченным вертикальным дренажом делает эти почвы склонными к переувлажнению, если оросительная норма превышает их естественную дренажную способность [56].

Камбисоли дистрические (участок III, глубина залегания грунтовых вод более 7 м) – умеренно развитые почвы без выраженных иллювиальных горизонтов, но с признаками начального выветривания и структурообразования [131, 76]. Определение «дистрические» указывает на степень насыщенности основаниями менее 50% и кислую реакцию среды – обычно результат интенсивного выщелачивания в условиях гумидного климата [76, 125]; такие почвы чаще всего формируются на кремнезёмистых материнских породах вроде гранитов и сланцев, которые выветриваются медленно и высвобождают мало катионов оснований. По сравнению с глейсолями и солончаками камбисоли дистрические, как правило, лучше дренированы и аэрированы: у них нет плотных переувлажнённых подпахотных горизонтов, характерных для оглеенных почв [131]. Но кислая

реакция и низкая насыщенность основаниями оборачиваются повышенным риском вымывания элементов питания при избыточном орошении [125].

Из этих различий вытекают и разные приоритеты в организации орошения на каждом участке. На солончаках глеевых (участок I) на первый план выходят контроль засоления и усиление дренажа: низкая водопроницаемость и высокое содержание солей делают эту почву уязвимой к вторичному засолению корнеобитаемого слоя при стандартных режимах орошения [48, 92]. Промывной режим здесь нужно рассчитывать исходя из солевого баланса почвы и качества оросительной воды, чтобы предотвратить накопление солей и одновременно избежать непроизводительных потерь воды [54, 151]; дренажные системы необходимы для отвода избыточной минерализованной воды и предотвращения подъёма уровня грунтовых вод [108, 147].

Для глейсолей молликовых (участок II) определяющим становится предотвращение переувлажнения при сохранении питательного режима: из-за высокой влагоёмкости и слабого дренажа частоту и объём поливов приходится ограничивать [56, 83]. Избыточное увлажнение способствует развитию анаэробных условий и восстановлению марганца и железа, что может оказывать токсическое действие на растения [107, 132].

Для камбисолей дистрических (участок III) главная задача – предотвращение вымывания элементов питания и регулирование кислотности почвы: качество и объём оросительной воды должны ограничивать вымывание катионов кальция, магния и калия [76, 125]. Дефицитное орошение на некритичных фазах развития культуры здесь допустимо и даже полезно для продуктивности использования воды, если, конечно, влажность почвы не опускается до уровня, вызывающего сильный стресс растений [53, 101]. Сводная сравнительная характеристика трёх типов почв катены и особенностей их орошения приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнительная характеристика почв ландшафтной катены р. Русизи и особенности их орошения

Тип почвы	Ключевые педогенетические признаки	Гидрологическое поведение	Основная проблема при орошении	Рекомендуемая стратегия
Солончаки глеевые (участок I)	Высокая засоленность, оглеение, слабая структура	Низкая инфильтрация, плохой дренаж, высокий уровень грунтовых вод	Вторичное засоление, переувлажнение	Расчёт промывного режима, дренаж
Глейсоли молликовые (участок II)	Высокое содержание органического вещества, оглеение, насыщенность основаниями	Высокая влагоёмкость, слабая водопроницаемость	Переувлажнение, анаэробная токсичность	Снижение кратности поливов, контроль влажности
Камбисоли дистрические (участок III)	Кислая реакция, низкая насыщенность основаниями	Хороший дренаж, умеренная влагоёмкость	Вымывание элементов питания, кислотность	Дефицитное орошение, контроль промывной фракции

Таким образом, тип почвы принципиально влияет на организацию орошения: солончаки глеевые требуют строгого управления засолением и дренажом для предотвращения переувлажнения и накопления солей [145, 92]; глейсоли молликовые – тщательного регулирования водного баланса, чтобы избежать переувлажнения и сохранить аэробные условия в корнеобитаемом слое [56, 140]; камбисоли дистрические при лучшей дренированности требуют стратегий, минимизирующих вымывание элементов питания и учитывающих кислотность [125, 52]. Учёт этих различий и составляет основу дифференцированного обоснования режима орошения кукурузы для трёх расчётных участков, которое разрабатывается в последующих главах настоящей работы.

Физические свойства почв региона Имбо существенно влияют на эффективность орошения кукурузы: тип почвы определяет, как культура поглощает воду в тропических условиях, воздействуя на её доступность, поведение корней и гидравлические свойства, от которых зависит эффективность извлечения воды растениями [29]. Текстура почвы, то есть соотношение песка, ила и глины, задаёт характеристики удержания и дренажа воды, критичные для поглощения

воды корнями кукурузы. Глинистые почвы, распространённые в регионе Имбо, имеют очень мелкие частицы с высокой способностью удерживать воду и питательные вещества, но при этом медленнее дренируются, а доступность воды для растений снижается – вода прочно удерживается в микропорах [60].

Гидрофизические свойства почвы, такие как проводимость и кривая удержания влаги, влияют на то, как вода перемещается к корням кукурузы.

При высыхании почвы кукуруза адаптирует поглощение воды за счёт более высокой проводимости корней в каменистых или грубых почвах, компенсируя дефицит воды, но начало водного стресса в этом случае наступает раньше, чем в илистых почвах, из-за сниженного потенциала почвенной влаги.

Органическое вещество в почве играет важную роль в удержании воды и формировании её структуры, увеличивая пористость и водоудерживающую способность. Для кукурузы в тропических почвах с высокой потребностью в воде это особенно важно: увеличение содержания органического вещества на 1% способно удержать дополнительно до 2850 галлонов воды на акр [29].

1.6. Природно-ресурсный потенциал региона Имбо

Регион Имбо – один из наиболее значимых с точки зрения природно-ресурсного потенциала экологических регионов Республики Бурунди: здесь сочетаются водные источники, плодородные сельскохозяйственные земли и относительно плоский рельеф, благоприятный для развития систем поверхностного орошения.

Низменность Имбо представляет собой самый крупный потенциально орошаемый регион Бурунди: на неё приходится около 75% всего ирригационного потенциала страны. На территории региона уже существует значимая ирригационная инфраструктура, в частности в округе Гиханга; эффективное распределение и использование воды в ирригационных системах остаётся существенным фактором повышения продуктивности, например, в рисоводческой области Мугереро [92]. Химический состав воды реки Русизи, определяющий её пригодность для орошения, приведён в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Химический анализ воды реки Русизи [89].

Место отбора	pH	Электрическая проводимость (мкСм/см)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻
			(мЭКВ/л)							
Верхнее течение Русизи	9,01	252	0,32	8,36	2,53	4,58	1,02	0,40	10,05	3,36
Русизи, ущелья	9,18	252	0,43	3,78	1,87	4,72	0,71	1,00	7,89	3,48
Нижнее течение Русизи	9,18	145	0,30	2,51	0,83	2,04	0,34	0,16	3,05	0,52
Нижнее течение Русизи	-	135	0,53	3,80	1,06	2,63	0,78	1,00	5,01	2,43

Озеро Танганьика, ограничивающее регион Имбо с запада, представляет собой значительный резервуар воды: оно даёт долгосрочную перспективу для планирования орошения и служит буфером против сезонных колебаний осадков [75]. Помимо реки Русизи, регион пересекается притоками Луа, Ньямагана, Кабурантва и Мпанда, которые могут служить локализованными источниками воды для орошения.

Деградация земель признана на национальном уровне значимым ограничением развития орошаемого земледелия: в стране принята национальная стратегия и план действий по борьбе с деградацией почв [142], выполнено картирование плодородия почв на общенациональном уровне [63], а экономическая оценка показывает, что издержки бездействия в этой сфере существенно превышают затраты на превентивные меры [79].

Общий ирригационный потенциал Бурунди оценивается в 123 тыс. га, из которых оборудована для орошения лишь малая часть – это подчёркивает значительные возможности для развития ирригационных схем в регионе Имбо. Программа институциональной и операционной поддержки сельскохозяйственного сектора (PAIOSA) на Северной равнине Имбо направлена на восстановление и новое орошение более 3000 га земли, что показывает масштаб развития, достижимого за счёт целенаправленных ирригационных инициатив.

Вместе с тем регион сталкивается и с экологическими рисками: изменение климата, по имеющимся прогнозам, увеличит частоту и величину наводнений в низменных территориях, таких как пойма Имбо, а надёжность существующей ирригационной инфраструктуры вызывает озабоченность – зафиксированы случаи разрушения плотин, влияющие на сельскохозяйственное производство на равнине Имбо.

1.7. Агроклиматическое районирование территории Республики Бурунди

Республика Бурунди расположена между $2^{\circ}20'$ и $4^{\circ}30'$ южной широты и $28^{\circ}50'$ и $30^{\circ}53'$ восточной долготы; площадь страны составляет 27 834 км². Высота территории меняется от 774 м у озера Танганьика до 2670 м на горе Хеха, чем и обусловлено выделение пяти агроклиматических зон: равнины Имбо, Конго-Нильского массива, Центрального плато, Северо-восточных впадин и впадины Кумоссо (рисунок 1.4, таблица 1.6.).

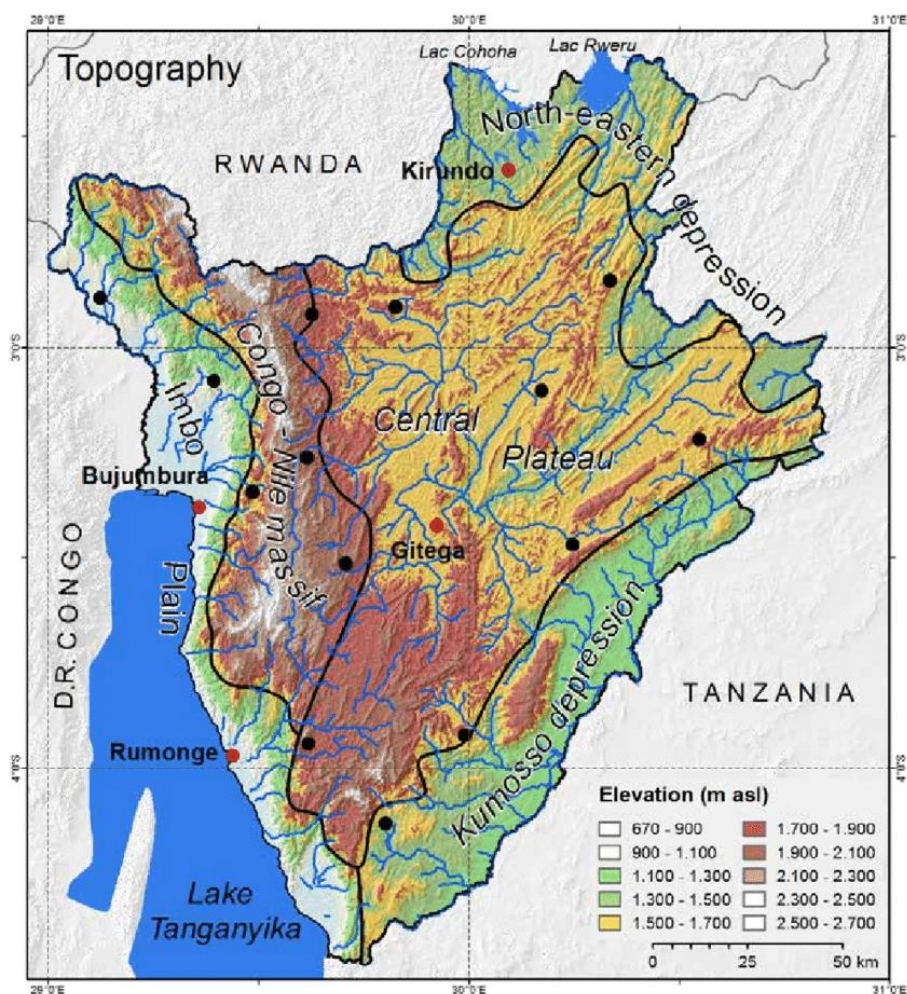


Рисунок 1.4 – Топография и агроклиматические зоны Бурунди.

Таблица 1.6 – Характеристики агроклиматических регионов Бурунди

Регион	Расположение	Высота над уровнем моря
Равнина Имбо	Запад	< 1000 м
Конго-Нильский массив	Запад	> 1000 м
Центральное плато	Центр	~1400–2000 м
Северо-восточные впадины	Северо-восток	~1200–1500 м
Впадина Кумоссо	Восток	~1150–1400 м

Остальные четыре агроклиматические зоны страны расположены существенно выше и имеют более прохладный и (или) более влажный климат по сравнению с равниной Имбо (таблица 1.6). Конго-Нильский массив (2000–3000 м, до 2670 м на горе Хеха) – водораздел между бассейнами Конго и Нил со средней температурой 17–18,5°C и осадками 1200–1400 мм, специализация – чай и кофе. Центральное плато (1500–2000 м) – регион с наибольшей плотностью населения страны, температура около 19°C, осадки 1200–1400 мм. Северо-восточные впадины (1200–1500 м) – заболоченные территории с умеренным климатом. Впадина Кумоссо (1200–1400 м, на границе с Танзанией) – температура 19–23°C, осадки 800–1100 мм, специализация – сахарный тростник, с потенциалом развития кукурузы и риса.

Сопоставление агроклиматических зон показывает, что равнина Имбо отличается наиболее высокими температурами и наиболее выраженным дефицитом естественного увлажнения в сухой сезон при относительно ровном рельефе, благоприятном для организации поверхностного орошения. Именно сочетание этих факторов и определило выбор региона Имбо в качестве объекта настоящего исследования.

Выводы к главе 1

1. Регион Имбо (775–1000 м над уровнем моря) характеризуется наиболее высокими на территории Бурунди температурами (23–24°C), умеренным годовым количеством осадков (около 800 мм) при выраженной бимодальной

сезонности и наиболее высокими значениями эвапотранспирации (5,40–6,88 мм/сут в сухой сезон), что определяет необходимость интенсивного орошения кукурузы именно в этом регионе.

2. Геологическое строение и гидрологический режим региона, катена вдоль реки Русизи, формируют неоднородность условий увлажнения по элементам рельефа поймы, что обосновывает дифференцированный подход к режиму орошения по типам почв и глубине залегания грунтовых вод на трёх расчётных участках, рассматриваемых в последующих главах.
3. Сопоставление равнины Имбо с остальными четырьмя агроклиматическими зонами Бурунди подтверждает обоснованность выбора именно этого региона в качестве объекта исследования: только здесь сочетаются высокий температурный режим, дефицит естественного увлажнения в сухой сезон и рельеф, благоприятный для организации поверхностного орошения.
4. Значительная доля неосвоенного ирригационного потенциала региона (Имбо обеспечивает около 75% ирригационного потенциала страны при использовании лишь его части) и наличие текущих программ его развития (PAIOSA) подтверждают практическую востребованность научно обоснованных режимов орошения кукурузы, разрабатываемых в настоящей диссертации.

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРОШЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ

2.1. Ресурсная обеспеченность и территориальное распределение орошения

Республика Бурунди располагает значительными водными ресурсами, включающими болота, реки и озёра, что создаёт благоприятные условия для развития ирригационных систем. Потенциал орошения, то есть площадь земель, пригодных для развития орошения по своим природным условиям, в Бурунди оценивается в 123 тыс. га, при этом фактически орошается только около 33% этой площади [109]. Данный показатель не следует смешивать с оценкой доли орошаемых земель в общей площади пахотных угодий страны – это два разных по методике определения показателя.

Пространственное распределение водных ресурсов при этом неоднородно: более 99% орошаемых полей сосредоточены на равнинах Имбо, Мосо и Бугезера, а также на болотах. Регион Имбо остаётся одним из основных регионов концентрации орошаемого земледелия в стране. Гидрологический потенциал страны в целом оценивается как высокий, но его эффективное использование ограничивается именно этой неравномерностью распределения по территории.

Ограниченность освоения ирригационного потенциала связана не только с инфраструктурными, но и с более общими аграрно-демографическими факторами: рост населения при сохраняющейся зависимости от богарного земледелия усиливает нагрузку на пахотные земли Бурунди [68, 69], а традиционная агропродовольственная система страны исторически формировалась в условиях ограниченного доступа к ирригационной инфраструктуре [70].

Аграрная динамика Бурунди подробно изучалась и в более ранний период: показано, что дифференциация аграрной системы страны имеет глубокие исторические корни [71], а разнообразие агроландшафтов отражает адаптацию земледелия к неоднородным природным условиям на протяжении длительного времени [72]; совокупный эффект демографического роста и ограниченности пахотных земель на динамику сельского хозяйства страны прослежен на протяжении нескольких десятилетий [73].

Мелиоративный режим в Бурунди характеризуется преимущественным использованием традиционных методов поверхностного орошения на гравитационных принципах. Традиционное орошение холмов представляет собой сложную систему на основе микроплотин и сети самотечных каналов; общинное управление водными ресурсами осуществляется по принципу временной ротации с почасовым распределением воды между участками, что сопряжено с неравномерным распределением воды, риском эрозии почвы и возможностью переувлажнения (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Традиционная ирригационная система в Бурунди (Республика Бурунди, регион Имбо; фото автора – И. Ичитегетсе): а – накопительный пруд для сбора воды; б – подводящий земляной канал; в – распределение воды по бороздам на орошаемом участке (кукуруза, лук).

На фоне преобладания традиционных систем в стране реализуются и отдельные экспериментальные проекты внедрения современных технологий орошения. Капельное орошение – одна из главных экспериментальных инноваций в сельскохозяйственном секторе Бурунди: технология обеспечивает точное и контролируемое распределение воды на уровне ризосферы через систему труб, регуляторов давления и калиброванных эмиттеров, что минимизирует потери на испарение (рисунок 2.2). Спринклерное орошение, имитирующее естественный процесс выпадения осадков, особенно эффективно на участках с неровным рельефом, где традиционные методы менее результативны.



Рисунок 2.2 – Опытный участок овощных культур (капуста, амарант *Amaranthus Dubius* — сорт, отличающийся высокой пищевой ценностью) с капельным орошением на платформе Mediabox и её сопутствующей инфраструктурой (гидропонный полив, фертигация, климат-контроль теплицы) в Бурунди [Фото – © MediaBox].

2.2. Проблемы и ограничения орошаемого земледелия в Республике Бурунди

Анализ ирригационных систем Бурунди позволяет выделить три группы взаимосвязанных ограничений, препятствующих реализации существующего ирригационного потенциала.

Технические и технологические ограничения включают структурные недостатки гидросельскохозяйственной инфраструктуры (неадекватное проектирование систем транспортировки воды), недостаточное обслуживание существующих сооружений, неоптимальную гидравлическую эффективность гравитационных систем и отсутствие регулярного мониторинга качества воды и стока.

Экономические и социальные ограничения связаны со значительным ростом стоимости ирригационного оборудования, что создаёт финансовый барьер для мелких фермеров, а также с инфляцией цен на семена и средства защиты растений, недостатком квалифицированного технического персонала и отсутствием эффективной нормативно-правовой базы управления водными ресурсами.

Экологические ограничения проявляются прежде всего в нерациональном расходовании водных ресурсов из-за потерь на испарение и инфильтрацию в незащищённых каналах, а также в риске эрозии почвы при традиционных методах поверхностного орошения.

2.3. Технологии орошения и продуктивность кукурузы в тропических условиях

Методика FAO CROPWAT ранее успешно применялась для расчёта режимов орошения в сопредельных странах Восточной Африки: для планирования орошения бананов в условиях региона [116], риса в Руанде [118] и кукурузы и риса в Танзании [127], что подтверждает методическую применимость модели для агроклиматических условий, близких к региону Имбо.

Помимо Восточной Африки, методика CROPWAT валидирована на культурах и климатах, далёких от условий Бурунди: для расчёта поливных норм в дельте Нила в Египте [85], для планирования орошения в агроклиматических зонах Мадхья-Прадеш в Индии [86], и для многолетних культур – кокосовой пальмы – в штате Керала [143], что демонстрирует применимость модели как для однолетних зерновых, так и для многолетних насаждений в условиях муссонного и аридного климата.

Применительно непосредственно к кукурузе методика CROPWAT (и смежные модели EPIC, AquaCrop, CERES) использовалась в средиземноморском климате Испании для моделирования урожайности кукурузы при водном стрессе [64] и в семиаридных условиях турецкой провинции Джукурова для расчёта изменения оросительных потребностей кукурузы под влиянием изменения климата [136], что подтверждает пригодность модели именно для этой культуры в широком диапазоне климатических условий, включая тропические.

Учитывая особенности агроклиматических условий региона Имбо, особый интерес представляют современные методы орошения, способствующие сохранению водных ресурсов при выращивании кукурузы.

Одним из наиболее эффективных методов считается чередующееся бороздковое орошение (Alternate Furrow Irrigation, AFI): оно позволяет поддерживать урожайность зерна при значительном сокращении расхода воды. Методика предполагает орошение чередующихся борозд в каждом цикле полива, что снижает общее потребление воды примерно на 38–45% по сравнению с традиционным бороздковым орошением [148].

Подсистемное капельное орошение (Subsurface Drip Irrigation, SSDI) в сочетании с элементами почвозащитного земледелия (Conservation Agriculture, CA) также показывает высокую эффективность в тропических условиях: такая комбинация сокращает расход поливной воды на 41,6–54%, одновременно увеличивая продуктивность использования воды более чем в 2,5 раза и улучшая производство биомассы [99].

Дефицитное орошение (Deficit Irrigation), при котором вода подаётся ниже полной потребности растений, стратегически распределённое по времени или сокращённое ради экономии воды при сохранении приемлемой урожайности, тоже даёт перспективные результаты: в тропическом выращивании кукурузы 55–85% эвапотранспирации сельскохозяйственных культур часто обеспечивают баланс между экономией воды и урожайностью [51].

2.3.1. Физиологические особенности водопотребления и продуктивности кукурузы в тропическом климате

Кукуруза относится к растениям с С4-типом фотосинтеза, что даёт ей существенные преимущества в условиях тропического климата, включая более эффективное использование воды по сравнению с С3-растениями. Это физиологическое преимущество позволяет кукурузе лучше адаптироваться к высоким температурам и интенсивной солнечной радиации, характерным для региона Имбо.

В тропических условиях потребность в воде для хорошо орошаемой кукурузы составляет, как правило, 500–800 мм за сезон, в среднем около 650 мм; в засушливых регионах Субсахарской Африки нижняя граница диапазона снижается до 450–600 мм. Наилучшие результаты кукуруза показывает при годовом количестве осадков 600–1000 мм. Расчётное значение суммарного водопотребления для условий, близких к региону Имбо, составило 695,4 мм и укладывается в указанный литературный диапазон, что подтверждает адекватность принятых исходных параметров расчёта [126].

Водопотребление растёт при увеличении плотности посадки кукурузы, хотя это сопровождается снижением испарения с поверхности почвы – иными словами, на плотно засаженных полях вода используется эффективнее [148]. Дефицитное орошение, варьирующееся от полного орошения до 25% эвапотранспирации культуры, по данным полевых экспериментов существенно влияет на водопотребление и урожайность кукурузы, что подчёркивает важность точного планирования орошения. Это особенно актуально для региона Имбо, где в течение сухого сезона эффективные осадки минимальны.

Чувствительность кукурузы к водному стрессу заметно меняется по фазам развития: наиболее критичны фазы цветения и формирования зерна, когда дефицит влаги способен существенно снизить урожайность [141].

2.3.2. Ресурсосберегающие технологии орошения кукурузы

Для различных климатических условий одной из наиболее эффективных технологий водосбережения при возделывании кукурузы остаётся капельное орошение: оно сокращает расход воды на 65–70% и минимизирует потери влаги, особенно эффективно в засушливых и жарких климатах [99].

Классификация современных способов полива по степени водосбережения и техническим требованиям к оборудованию подробно рассмотрена в [24, 36]: поверхностные способы (требуют минимальных капитальных вложений, но обеспечивают наименьшую экономию воды; дождевание занимает промежуточное положение по стоимости и эффективности; капельное и подпочвенное капельное орошение дают наибольшую экономию воды, но требуют значительных вложений в оборудование, его обслуживание и квалифицированный персонал.

Применительно к условиям Бурунди эта иерархия технологий приобретает практическое значение: описанные выше методы существенно различаются по капиталоемкости, а значит и по реалистичности внедрения. Чередующееся бороздковое орошение [148] и дефицитное орошение [51] не требуют специализированного оборудования и могут быть внедрены на основе уже существующей инфраструктуры поверхностного полива, тогда как подпочвенное капельное орошение [99], при всей его эффективности, предполагает капитальные затраты, доступность которых для мелких хозяйств Бурунди ограничена. Иными словами, наиболее эффективная по расходу воды технология не обязательно наиболее применима в конкретных условиях региона – выбор технологии определяется соотношением водосберегающего эффекта и доступности инвестиций.

2.4. Технологический уровень возделывания кукурузы в Бурунди

Для Бурунди, как и для всей Центральной Африки, характерно мелко- и среднетоварное растениеводство с ручной или полуручной обработкой, ограниченным доступом к удобрениям, качественным семенам, механизации и защите растений. Причина в дефиците капитала, консультационного

сопровождения и стабильного рынка ресурсов, а результат – низкий коэффициент реализации радиационного потенциала продуктивности. Основные потери урожая на сегодняшний день возникают из-за несоблюдения оптимальных сроков посева, неравномерности сева, дефицита биогенных и органических веществ, низкой культуры агротехники, а также потерь при уборке и хранении урожая.

Совокупность этих факторов сводится к ограниченному числу управляемых элементов агротехнологии: своевременность и равномерность сева, обеспеченность минеральным питанием, контроль сорной растительности и болезней, качество и своевременность уборки. Обобщённая по данным [67, 81, 98] и с учётом практики, апробированной в аналогичных агроклиматических условиях [135, 149, 150], программа мероприятий по совершенствованию агротехнологии кукурузы в условиях Бурунди сводится к трём направлениям: соблюдению регулярности и сроков посева, экономному внесению удобрений и снижению потерь урожая на всех этапах производственного цикла. У каждого направления есть свои характерные риски: избыточная густота посева на бедных почвах, внесение удобрения в прямой контакт с семенами или химическая защита без точной диагностики вредителя способны скорее снизить, чем повысить итоговый эффект мероприятий.

2.5. Индикативная оценка потенциальной продуктивности кукурузы по радиационному балансу с учетом технологического уровня возделывания

Разрыв между теоретически достижимой и фактически реализуемой продуктивностью кукурузы в регионе Имбо можно проиллюстрировать индикативной оценкой по радиационному балансу, рассчитанной по стандартной методике оценки радиационного потенциала продуктивности [10, 80, 106, 114, 134]. Приводимая ниже оценка носит ориентировочный, иллюстративный характер: она не заменяет полевых исследований с использованием конкретных сортов кукурузы, не заменяет статистику урожайности и не учитывает детального моделирования водного, воздушного и пищевого режимов почв. Детальное обоснование дифференцированного режима орошения кукурузы по типам почв ландшафтной катены – предмет последующих глав настоящей работы.

В расчёте принято, что сельскохозяйственные угодья расположены в пределах трёх фаций ландшафтной катены в низовье реки Русизи севернее озера Танганьика; сельскохозяйственная культура – кукуруза (маис) на зерно.

Расчёт верхнего радиационного потенциала продуктивности кукурузы выполнен по формуле:

$$Y_{\text{зерно, 14\%}} = 0,01 \times RUE \times Hi \times \left(\frac{1}{1-W} \right) \times \sum (PAR_t \times FAPAR_t), \quad (2.1)$$

где $PAR_t = 0,48 \times R_s$ – фотосинтетически активная радиация (ФАР) (R_s – приходящая коротковолновая радиация); $FAPAR_t$ – доля ФАР, поглощённая посевом; RUE – радиационная эффективность использования поглощённой ФАР, принята равной 3,8 г сухой надземной биомассы на 1 МДж поглощённой ФАР; Hi – индекс урожая, принят равным 0,50; W – стандартная влажность товарного зерна, 14%; t – длительность расчётного сезона, 120 суток.

Средняя приходящая коротковолновая радиация принята равной 5,8 кВт·ч/м²/сут (20,9 МДж/м²/сут), доля ФАР в ней – 0,48, средняя доля поглощения ФАР посевом – 0,70 (для хорошо сформированного, но усреднённого по сезону посева). Расчёт по шагам сведён в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчёт верхнего радиационного потенциала продуктивности кукурузы

Показатель	Расчёт	Значение
Коротковолновая радиация R_s	$5,8 \times 3,6$	20,9 МДж/м²/сут
ФАР за сутки	$0,48 \times 20,9$	10,0 МДж/м²/сут
ФАР за 120 суток	$10,0 \times 120$	1200 МДж/м²
Поглощённая ФАР	$1200 \times 0,70$	840 МДж/м²
Сухая надземная биомасса	$3,8 \times 840$	3192 г/м² = 31,9 т/га
Сухое зерно	$31,9 \times 0,50$	16,0 т/га
Зерно при 14% влажности ($Y_{\text{ФАР,потенц}}$)	$16,0 / 0,86$	18,6 т/га

Полученное значение 18,6 т/га – это не ожидаемая производственная урожайность, а верхний радиационный потолок при отсутствии существенных

ограничений по воде, минеральному питанию, густоте, сорнякам, болезням, вредителям и качеству агротехнических операций.

Для более реалистичной оценки в расчёт вводится мультипликативный коэффициент реализации потенциала продуктивности, учитывающий фактический уровень агротехнологии по шести факторам:

$$Y_{real} = Y_{\text{зерно, 14\%}} \times K_W \times K_N \times K_S \times K_{w/p} \times K_m \times K_{loss}, \quad (2.2)$$

где K_W – водный режим, K_N – питание и плодородие, K_S – семена, густота и равномерность всходов, $K_{w/p}$ – сорняки, вредители и болезни, K_m – сроки и качество операций, K_{loss} – уборочные и послеуборочные потери.

Такой подход сохраняет физический смысл расчёта: радиационный ресурс остаётся высоким, но при низком уровне технологии основным ограничением выступает не солнечная радиация, а минеральное питание, густота стояния, сорная растительность, сроки операций и потери. Значения поправок приведены в таблице 2.2.

При базовых значениях поправок ($K_W = 0,75$; $K_N = 0,35$; $K_S = 0,65$; $K_{w/p} = 0,75$; $K_m = 0,85$; $K_{loss} = 0,90$) реалистичная оценка для низкого уровня агротехнологии в регионе Имбо составляет:

$$Y_{real} = 18,6 \times 0,75 \times 0,35 \times 0,65 \times 0,75 \times 0,85 \times 0,90 \approx 2,0 \text{ т/га}. \quad (2.3)$$

То есть при существующем уровне технологии базовая оценка урожайности составляет около 1,8–2,0 т/га зерна при 14% влажности.

Сценарная шкала показывает, что диапазон реалистичной урожайности кукурузы в регионе Имбо простирается от 0,9–1,5 т/га при очень низком уровне технологии до 6,5–8,4 т/га при хорошо управляемых демонстрационных посевах (таблица 2.3) – более чем пятикратный разрыв определяется не природно-радиационными условиями региона (они благоприятны), а исключительно уровнем реализуемой агротехнологии.

Таблица 2.2 – Значения поправок в составе мультипликативного коэффициента реализации потенциала

Фактор	Реалистичная поправка	Интерпретация
Водный режим, Kw	0,65–0,85	Дождевое земледелие, сухие периоды, нестабильное распределение осадков
Питание и плодородие, KN	0,25–0,45	Главный лимитирующий фактор: дефицит N, P, K, истощение почв
Семена, густота, равномерность, Ks	0,55–0,75	Местные/открытоопыляемые сорта, разреженность, неоднородные всходы
Сорняки, вредители, болезни, Kw/p	0,65–0,85	Ручная прополка, слабая защита растений
Сроки и качество операций, Km	0,75–0,90	Запоздание сева, неоднородная ручная обработка
Уборочные потери, Kloss	0,85–0,95	Потери при уборке, сушке, хранении

Таблица 2.3 – Сценарная шкала потенциальной продуктивности кукурузы в регионе Имбо

Сценарий	Коэффициент реализации ФАР-потенциала	Урожайность зерна 14%, т/га
Крайне отсталая технология	0,05–0,08	0,9–1,5
Типичное низкотехнологичное хозяйство	0,08–0,13	1,5–2,4
Низко-средний уровень	0,13–0,19	2,4–3,5
Улучшенная технология	0,20–0,30	3,7–5,6
Демонстрационные/исследовательские посевы	0,35–0,45	6,5–8,4

Приведённая оценка носит ориентировочный характер: она не учитывает конкретный сорт кукурузы, суточный ход радиации и осадков, а использованные коэффициенты реализации потенциала – экспертные и нуждаются в калибровке по фактической статистике урожайности. Тем не менее полученный порядок величин – теоретический потолок около 18–19 т/га против реалистичной урожайности 1,8–2,0 т/га при существующем уровне технологии – наглядно показывает: разрыв между природно-ресурсным потенциалом региона Имбо и фактически реализуемой продуктивностью кукурузы обусловлен не климатическими ограничениями, а совокупностью технологических факторов, среди которых определяющую роль играет научно обоснованное управление водным режимом почв.

Выводы к главе 2: современное состояние, ограничения и научная проблема исследования

1. Анализ литературных данных демонстрирует высокую эффективность технологий ресурсосберегающего и дифференцированного по фазам развития культуры орошения кукурузы (чередующееся бороздковое орошение, подсистемное капельное орошение, дефицитное орошение), обеспечивающих существенную экономию воды при сохранении урожайности [148, 99, 51]. Наиболее критичными по чувствительности к водному дефициту остаются фазы цветения и формирования зерна [141], что определяет необходимость дифференцированного по фазам развития культуры подхода к нормированию поливов и напрямую связано с реализацией продуктивности культуры.
2. Республика Бурунди обладает значительным неиспользуемым ирригационным потенциалом (123 тыс. га, из которых освоено около 33% [109]), сосредоточенным преимущественно в регионе Имбо, при этом современное состояние орошаемого земледелия характеризуется преобладанием традиционных гравитационных систем и лишь единичными экспериментальными внедрениями современных технологий (капельное, спринклерное орошение).
3. Реализация имеющегося ирригационного потенциала ограничивается комплексом технических (структурные недостатки инфраструктуры, потери на испарение и инфильтрацию), экономических (высокая стоимость оборудования, дефицит квалифицированных кадров) и экологических (эрозия, нерациональное расходование воды) факторов.
4. Технологический уровень возделывания кукурузы выступает самостоятельным лимитирующим фактором: индикативная оценка по радиационному балансу показывает более чем пятикратный разрыв между теоретически достижимой (18–19 т/га) и реалистичной при существующем уровне агротехнологии (1,8–2,0 т/га) продуктивностью. Это подтверждает, что ограничивающим фактором в регионе Имбо являются не природно-

климатические условия, а управление ресурсами, в том числе водным режимом почв.

5. Вместе с тем проведённый анализ выявляет научный пробел, определяющий содержание последующих глав настоящей работы: описанные в литературе технологии ресурсосбережения и методы количественной оценки водопотребления не адаптированы к конкретным почвенно-гидрологическим условиям региона Имбо. Для условий страны отсутствуют верифицированные климатические ряды, пригодные для расчёта режимов орошения, и не проводилось сопоставление независимых расчётных методов (FAO CROPWAT 8.0 и математической модели влагопереноса А.И. Голованова) применительно к разным типам почв ландшафтной катены, отличающимся глубиной залегания грунтовых вод. Это в конечном счёте ограничивает возможности научного обоснования продуктивности кукурузы в регионе.
6. Устранение этого пробела требует, во-первых, формирования верифицированной климатической основы расчётов для региона Имбо – обоснование применимости данных реанализа AgERA5 и оценка климатических трендов составляют предмет следующей главы, и, во-вторых, последовательного расчёта и сопоставления дифференцированных по типам почв режимов орошения кукурузы двумя независимыми методами, что и составляет содержание последующих глав настоящей диссертации.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ОБОСНОВАНИЕ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НОРМ В УСЛОВИЯХ БУРУНДИ

Развитие орошаемого земледелия – основа продовольственной независимости Республики Бурунди, притом, что естественная влагообеспеченность ландшафтов страны в целом благоприятна. Устойчивая продуктивность сельскохозяйственных культур при расширенном воспроизводстве плодородия почв и экономичном использовании ресурсов достижима только при обоснованном мелиоративном режиме, а это, в свою очередь, требует достоверной климатической базы для расчёта водопотребления сельскохозяйственных культур.

Традиционно для обоснования режимов орошения используются данные метеорологических станций, однако в условиях развивающихся стран сеть наблюдений характеризуется недостаточной пространственной плотностью и наличием пропусков в рядах данных. Альтернативой служат данные климатического реанализа, такие как AgERA5, специально разработанные для агрометеорологических применений и обеспечивающие пространственно непрерывное покрытие территории. Их применение рассматривается в настоящей главе не как замена натурных наблюдений, а как способ восполнения указанных ограничений станционной сети.

Возможность использования климатических данных реанализа AgERA5 для обоснования мелиоративного режима орошаемых земель Республики Бурунди устанавливается путём их сопоставления с данными непосредственных наблюдений на метеостанциях страны и оценки достоверности реанализа.

3.1. Метеорологические наблюдения и данные реанализа AgERA5: характеристика исходных данных

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ данных, полученных в результате инструментальных измерений на шести метеорологических станциях Республики Бурунди, и данных реанализа AgERA5. Координаты расположения метеостанций приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Координаты расположения метеостанций

№	Метеостанция	Долгота, °	Широта, °	Высота над уровнем моря, м
1	Бужумбура (аэропорт)	29,32	–3,32	783
2	Имбо (Семс)	29,35	–3,18	820
3	Киньяня	30,33	–3,65	1308
4	Мпарамбо	29,08	–2,83	887
5	Мусаса	30,10	–4,00	1260
6	Ньянза-Лак	29,62	–4,32	820

Климатические данные реанализа представляют собой комплексные наборы данных, полученные путём объединения множества источников информации (наземные наблюдения, метеорологические спутники, измерения буями, кораблями и самолётами) и последующей ассимиляции этих данных климатическими моделями. Основное преимущество реанализа в том, что он обеспечивает однородные и согласованные данные о климате за длительные периоды времени и тем самым устраняет проблемы неоднородности и прерывистости прямых наблюдений. Крупные проекты реанализа реализуются ведущими метеорологическими центрами мира, в частности Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), на данных которого построен ряд флагманских продуктов реанализа [95, 59, 74, 94].

Точность данных AgERA5 применительно к агрометеорологическим задачам ранее оценивалась и для других регионов: показано удовлетворительное качество этих данных при сопоставлении с MERRA-2 для целей мелкомасштабных сельскохозяйственных приложений [139], при оценке сезонных и экстремальных температур на юге Африки [105], а также при использовании реанализа в качестве метеорологического входа для расчёта эвапотранспирации в Африке и Юго-Западной Азии [144], что в целом согласуется с результатами настоящей главы.

3.2. Методика сопоставления данных реанализа AgERA5 и метеорологических наблюдений

Для графической интерпретации и сопоставления рядов метео данных использованы блочные диаграммы (boxplot), позволяющие оценить медиану, межквартильный размах и наличие выбросов в распределении суммарных месячных осадков, относительной влажности воздуха и температуры за 30-летний период по каждому из шести пунктов наблюдений. Результаты сопоставления представлены на рисунках 3.1–3.6.

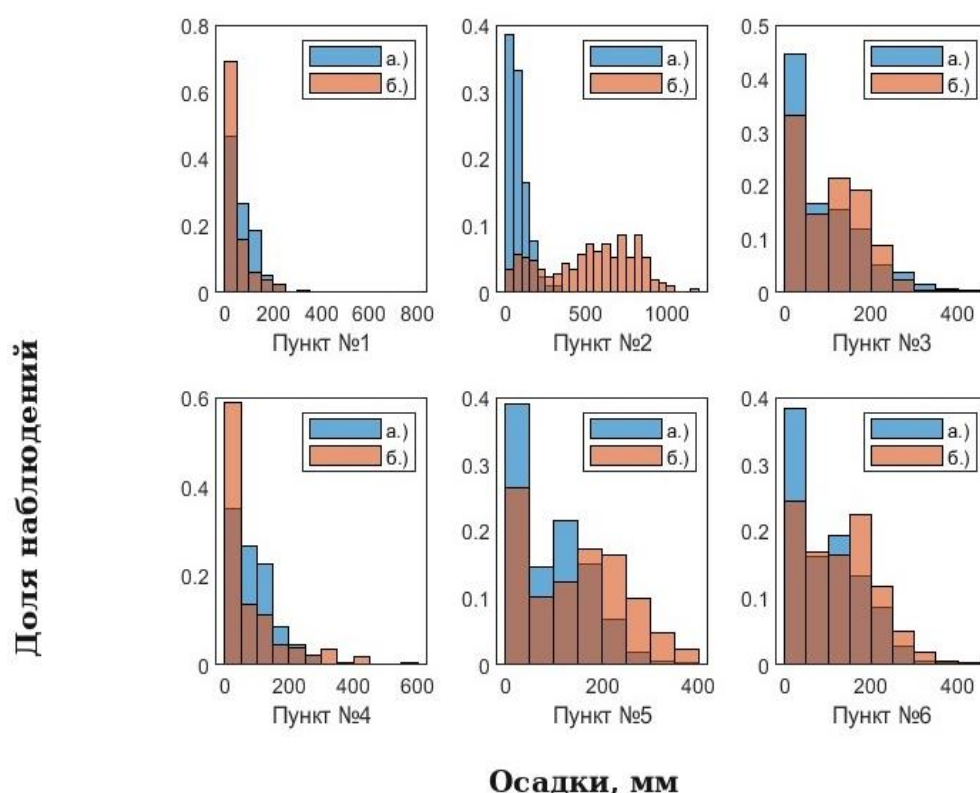


Рисунок 3.1 – Доля характерных суммарных месячных значений осадков в общем массиве данных метеонаблюдений и реанализа. а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа. Ось абсцисс – суммарные месячные осадки, мм; ось ординат – доля наблюдений от общего числа. Более тёмный (коричневый) оттенок соответствует области перекрытия столбцов а) и б), а не отдельному ряду данных.

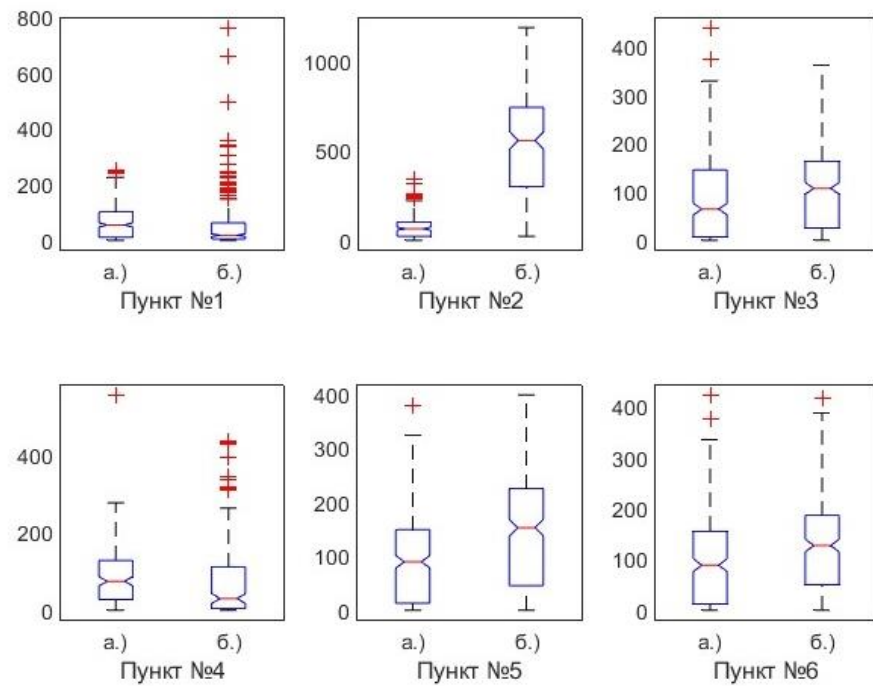


Рисунок 3.2 – Блочная диаграмма с ограничителями выбросов значений суммарных месячных осадков. а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа. Ось ординат — суммарные месячные осадки, мм. Сужение (выемка) прямоугольника показывает 95%-й доверительный интервал медианы; красная линия — медиана; крестики — статистические выбросы.

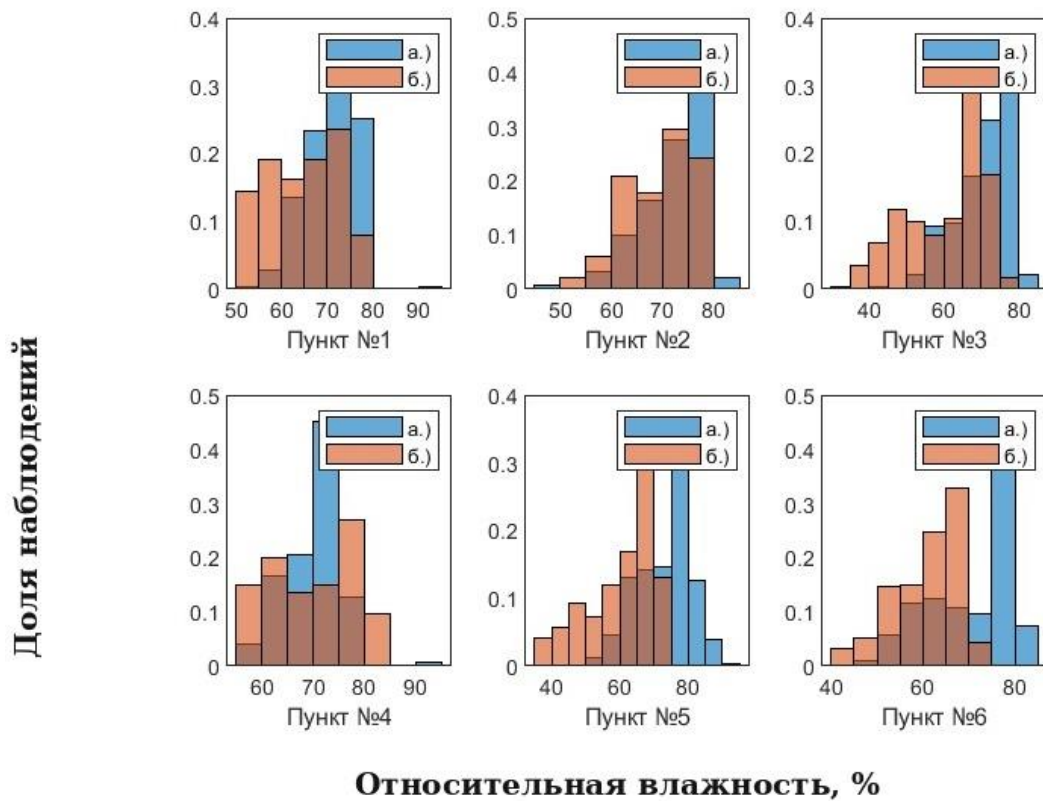


Рисунок 3.3 – Доля характерных относительных среднемесячных значений влажности воздуха в общем массиве данных метеонаблюдений и реанализа. а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа. Ось абсцисс — относительная влажность воздуха, %; ось ординат — доля наблюдений от общего числа. Более тёмный (коричневый) оттенок соответствует области перекрытия столбцов а) и б), а не отдельному ряду данных.

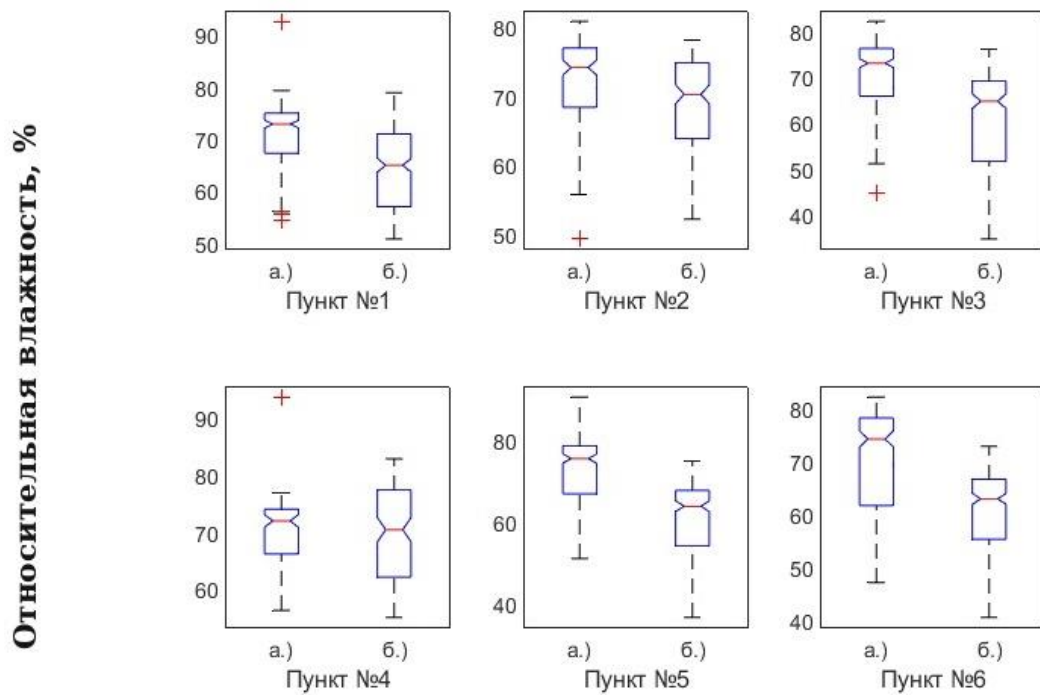


Рисунок 3.4 – Блочная диаграмма с ограничителями выбросов относительных среднемесячных значений влажности воздуха. а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа. Ось ординат — относительная влажность воздуха, %. Сужение (выемка) прямоугольника показывает 95%-й доверительный интервал медианы; красная линия — медиана; крестики — статистические выбросы.

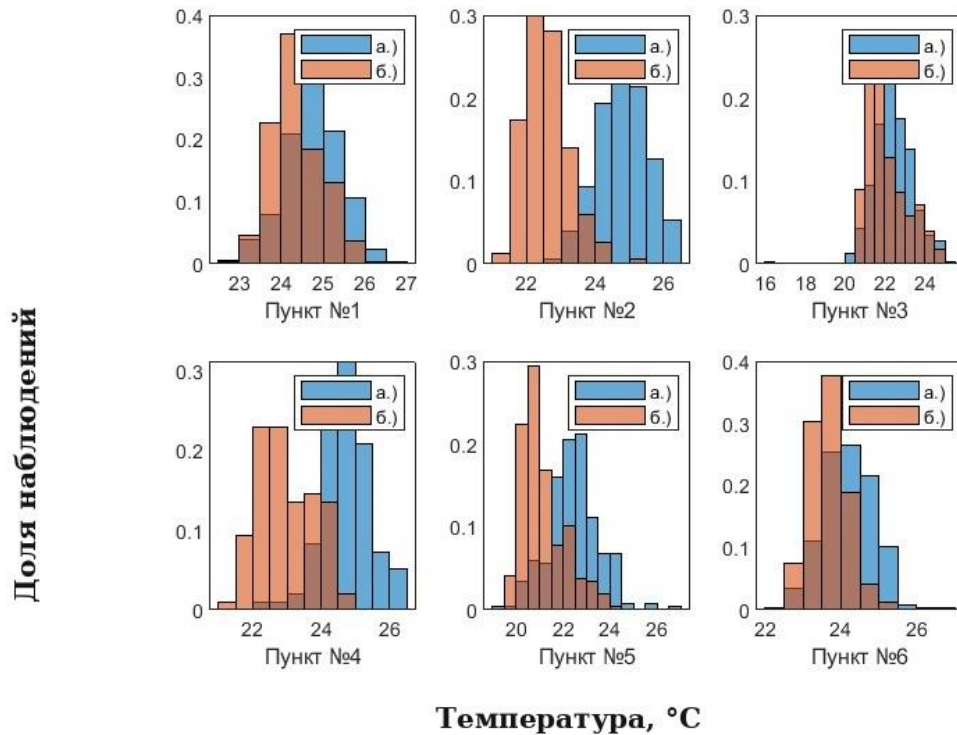


Рисунок 3.5 – Доля характерных среднемесячных значений температуры воздуха в общем массиве данных метеонаблюдений и реанализа. а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа. Ось абсцисс — среднемесячная температура воздуха, °C; ось ординат — доля наблюдений от общего числа. Более тёмный (коричневый) оттенок соответствует области перекрытия столбцов а) и б), а не отдельному ряду данных.

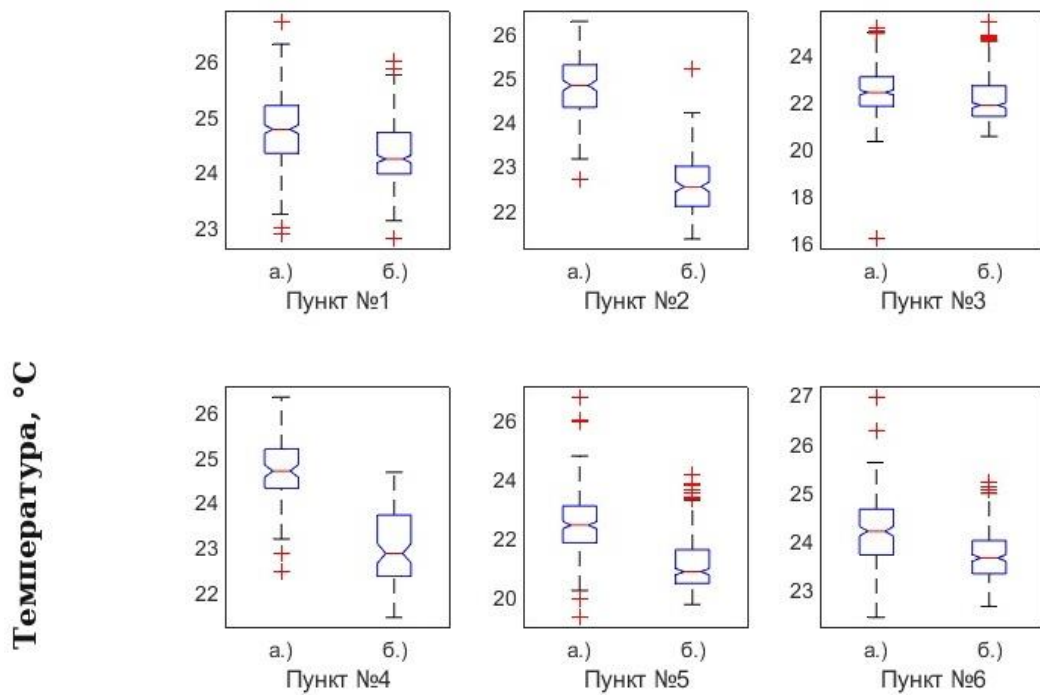


Рисунок 3.6 – Блочная диаграмма с ограничителями выбросов среднемесячных значений температуры воздуха. а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа. Ось ординат — среднемесячная температура воздуха, °C. Сужение (выемка) прямоугольника показывает 95%-й доверительный интервал медианы; красная линия — медиана; крестики — статистические выбросы.

Для каждого из трёх климатических параметров построена пара диаграмм: диаграмма долей характерных значений (рисунок 3.1, 3.3, 3.5) показывает, насколько сходно два источника данных распределяют наблюдения по величине признака на каждом из шести пунктов (Бужумбура-аэропорт, Имбо (Семс), Киньиня, Мпарамбо, Мусаса, Ньянза-Лак), а блочная диаграмма с ограничителями выбросов (рисунок 3.2, 3.4, 3.6) детализирует это сравнение через медиану, межквартильный размах и выбросы отдельно по данным метеонаблюдений и по данным реанализа. На всех шести графиках визуально выделяются пункты Бужумбура (аэропорт) и Ньянза-Лак, где границы блоков и характер распределения двух источников данных совпадают наиболее тесно, тогда как для Имбо (Семс), Киньиня, Мпарамбо и Мусаса заметны более широкое расхождение медиан и

различие в разбросе значений – в разной степени и по разным параметрам, что соответствует картине стационарных расхождений, количественно раскрытой ниже.

3.3. Сопоставление данных реанализа спутника AgERA5 и данных фактических наблюдений на метеостанциях

Проведённое сопоставление данных реанализа AgERA5 с фактическими наблюдениями на шести метеостанциях Республики Бурунди (Бужумбура-аэропорт, Имбо (Семс), Киньяня, Мпарамбо, Мусаса, Ньянза-Лак) выявило существенное расхождение по ряду пунктов: по суммарным месячным осадкам – в Имбо (Семс) и Мусаса; по относительной среднемесячной влажности воздуха – в Киньяня, Мусаса и Ньянза-Лак; по среднемесячной температуре воздуха – в Имбо (Семс), Мпарамбо и Мусаса. Наиболее вероятная причина – сочетание качества стационарных наблюдений с влиянием на данные реанализа изменчивости погодных условий, континентальных африканских тенденций изменения климата и особенностей микроклимата перечисленных пунктов.

Наилучшее соответствие данных реанализа и фактических наблюдений получено для пунктов Бужумбура (аэропорт) и Ньянза-Лак, что объясняется стабилизирующим влиянием озера Танганьика на метеопараметры прилегающих территорий. С учётом изложенного при определении дефицита водопотребления сельскохозяйственных культур для обоснования режимов орошения на участках, удалённых от пунктов наблюдения, допустимо использование климатических интерпретаций реанализа; на участках, расположенных вблизи метеостанций, несмотря на неполноту рядов данных, предпочтительно использовать данные фактических наблюдений.

3.4. Климатические тренды и детальная оценка расхождений AgERA5 с данными метеостанции Бужумбура

Изменение климата меняет режим выпадения осадков, усиливает колебания температуры и увеличивает частоту сильных погодных явлений в Республике Бурунди [120], что затрудняет планирование сроков посадки и сбора урожая и создаёт дополнительную нагрузку на водные ресурсы, используемые для

орошения. Аналогичные тенденции зафиксированы и в сопредельном горном регионе Бурунди–Руанда, где локальные наблюдения фермеров подтверждают рост температуры и изменение режима осадков [122], а анализ данных по Восточной Африке в целом показывает усиление засушливых трендов на фоне роста температур [103].

Анализ тенденции изменения осадков в регионе Имбо за период 1995–2024 гг. (рисунок 3.7) показывает разнонаправленную межгодовую изменчивость при общей слабой тенденции к росту годовой суммы осадков на фоне выраженных отклонений в отдельные годы [121, 133]. Это подтверждает необходимость использования протяжённого и пространственно однородного ряда данных при обосновании оросительных норм.

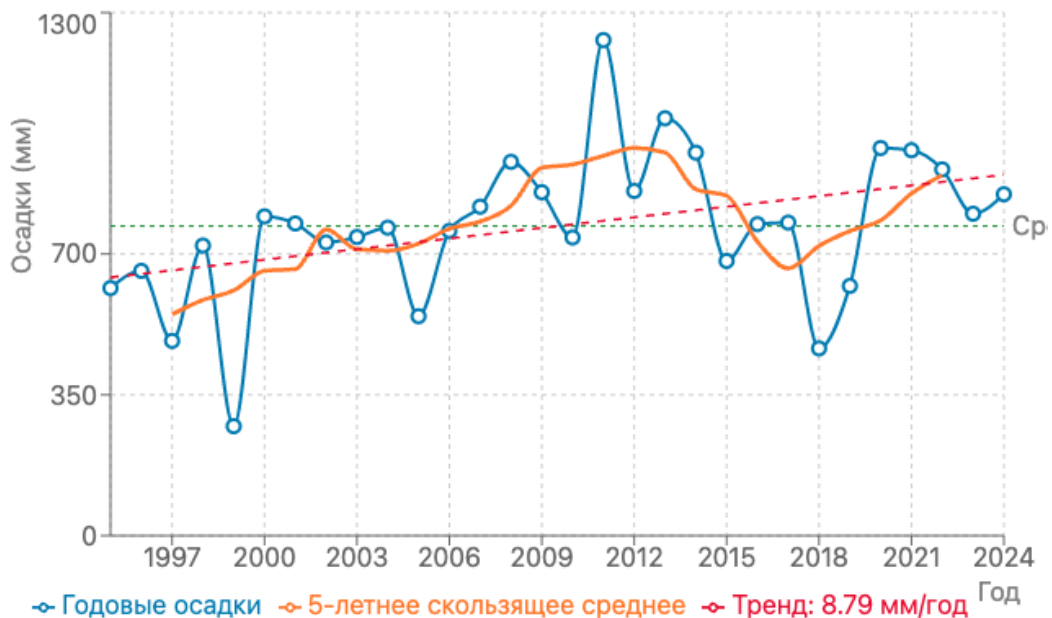


Рисунок 3.7 – Анализ тенденции изменения осадков в регионе Имбо (1995–2024).

Более детальная количественная проверка выполнена для метеостанции Бужумбура ($3,32^\circ$ ю.ш., $29,32^\circ$ в.д., высота 783 м) за период 1991–2020 гг. по среднемесячным значениям температуры воздуха, относительной влажности воздуха и суммарным месячным осадкам.

Температура воздуха. Средняя температура воздуха по данным метеостанции составляет около $24,7^\circ\text{C}$, тогда как реанализ демонстрирует систематически более низкие значения, около $24,2^\circ\text{C}$; систематическое расхождение – приблизительно $0,5^\circ\text{C}$ (рисунок 3.8). Обе линии тренда показывают слабую положительную

тенденцию повышения температуры на $0,5\text{--}0,7^\circ\text{C}$ за анализируемый период. Доверительные интервалы обоих источников частично перекрываются, что говорит о статистической согласованности данных.

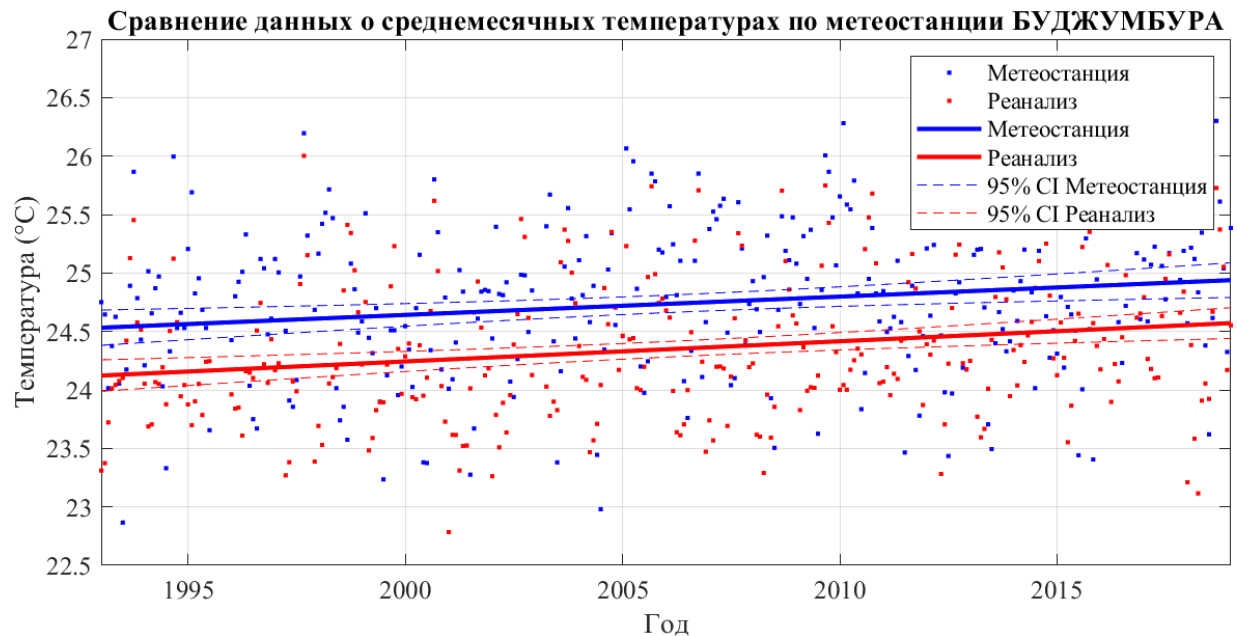


Рисунок 3.8 – Изменение температуры воздуха по данным метеостанции

Бужумбура и данных реанализа AgERA5 за период 1991–2020 г.

Анализ изменения среднегодовой температуры за период 1991–2020 гг. демонстрирует выраженную территориальную неоднородность с градиентом от $0,3^\circ\text{C}$ до $0,9^\circ\text{C}$ (рисунок 3.9): минимальное потепление ($+0,3\text{--}0,4^\circ\text{C}$) наблюдается вдоль западного побережья озера Танганьика благодаря его терморегулирующему эффекту, тогда как центральное плато испытывает максимальное повышение температуры ($+0,8\text{--}0,9^\circ\text{C}$) из-за отсутствия крупных водных стабилизаторов климата.

Относительная влажность воздуха. Среднее значение по данным метеостанции составляет около 71%, тогда как реанализ демонстрирует систематически более низкие значения, около 64% (рисунок 3.10); линии тренда обоих источников практически горизонтальны, то есть значимых изменений средней относительной влажности за период наблюдений не выявлено. Систематическое занижение влажности данными реанализа обусловлено особенностями модельных расчётов с пространственным осреднением, не учитывающим в полной мере влияние локальных источников влаги.

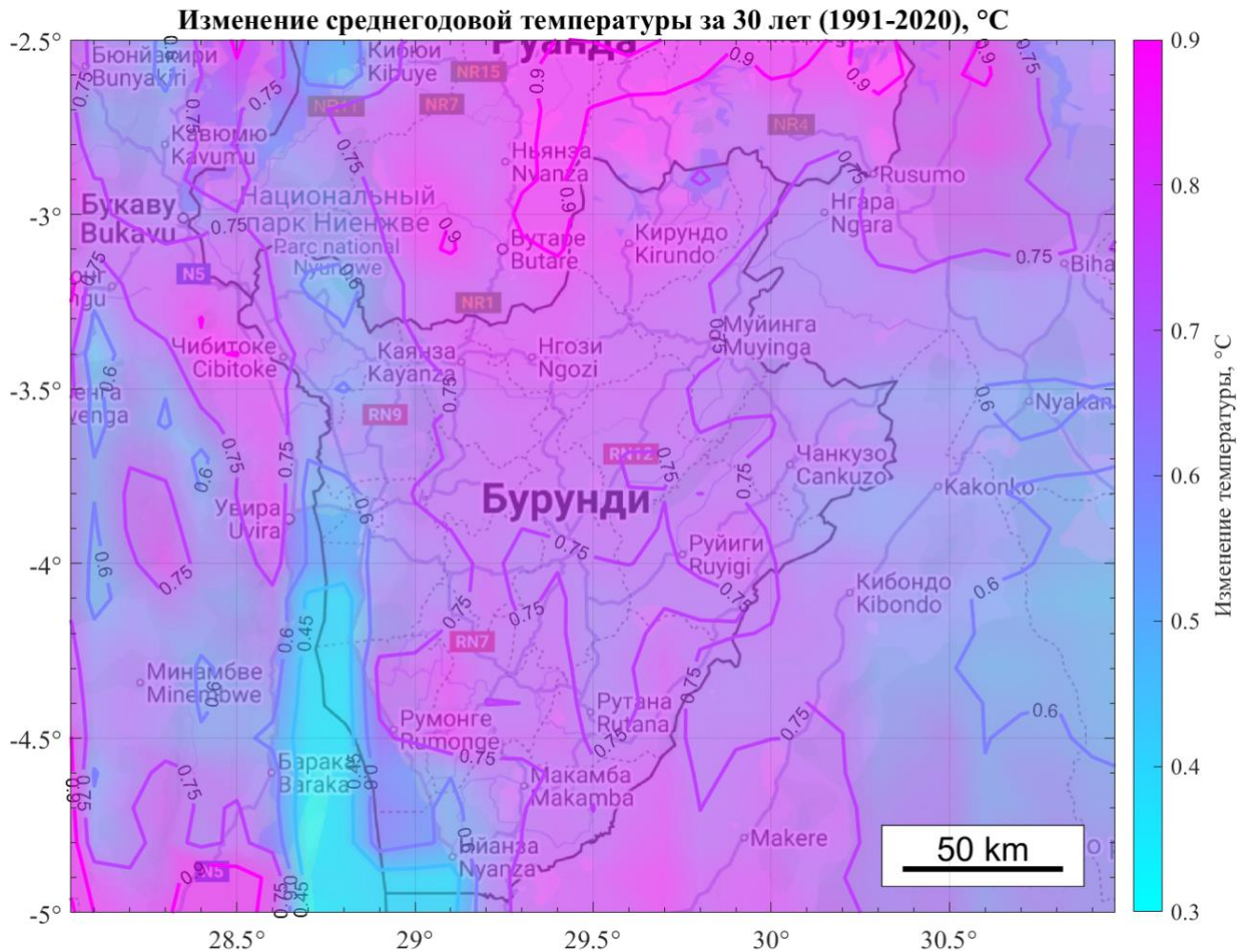


Рисунок 3.9 – Изменение температуры воздуха на территории Республики Бурунди по данным реанализа AgERA5 за период с 1991 по 2020 г.

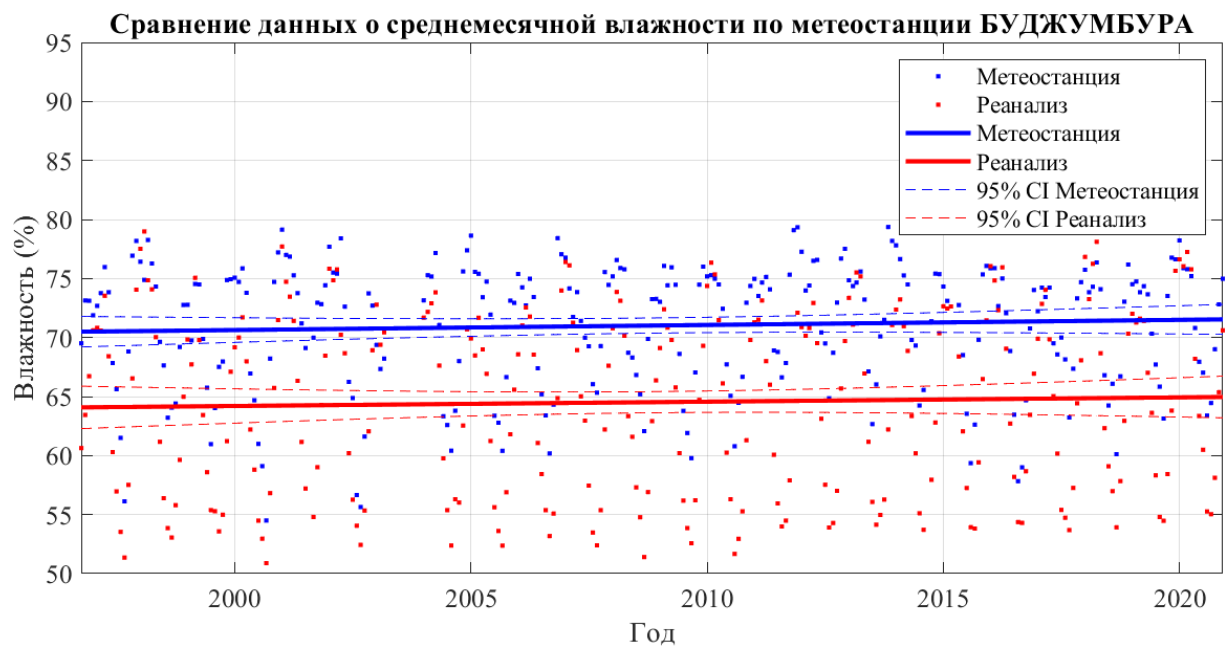


Рисунок 3.10 – Среднемесечная влажность воздуха по данным метеостанции Бужумбура и данных реанализа AgERA5 за период 1991–2020 г.

Суммарные месячные осадки. Оба источника данных демонстрируют значительное изменение суммарных месячных осадков – с 52 мм до 67 мм по метеостанции Бужумбура и с 34 мм до 55 мм по реанализу AgERA5 за период 1991–2020 гг. – и высокую вариабельность с экстремальными значениями, достигающими 180–200 мм (рисунок 3.11). Обе линии тренда показывают тенденцию к увеличению годовых осадков за период наблюдений; недооценка реанализом экстремальных осадков связана с пространственным осреднением и особенностями параметризации конвективных процессов в численной модели.

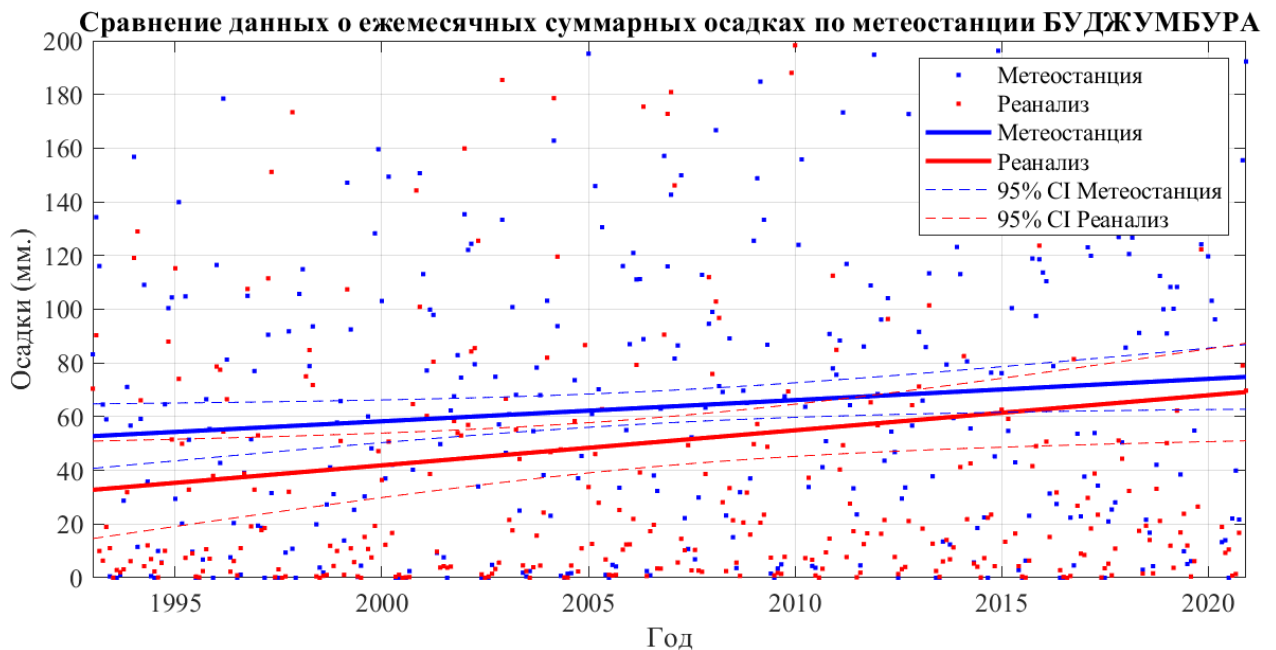


Рисунок 3.11 – Суммарные месячные осадки по данным метеостанции Бужумбура и данных реанализа AgERA5 за период 1991–2020 г.

Выявленное повышение температуры на $0,3\text{--}0,5^{\circ}\text{C}$ за период 1991–2020 гг. имеет прямые последствия для орошаемого земледелия: растёт эвапотранспирация, повышается водопотребление. Пространственная неоднородность температурных изменений требует дифференцированного подхода к планированию режимов орошения по агроклиматическим зонам, при этом равнина Имбо характеризуется максимальными темпами потепления среди основных регионов орошаемого земледелия страны.

Систематическое занижение относительной влажности на 7% имеет существенное значение, поскольку влажность – критический параметр, определяющий дефицит

влажности воздуха: занижение влажности приводит к завышению расчётной эвапотранспирации примерно на 8–10%, что критично для определения поливных норм, особенно в сухой сезон.

Сопоставительный анализ данных реанализа AgERA5 и метеостанции Бужумбура за период 1991–2020 гг. в целом выявил систематические расхождения по всем анализируемым параметрам: реанализ систематически занижает температуру воздуха на 0,5°C, относительную влажность на 7% и суммарные осадки на 17–20% по сравнению с данными непосредственных наблюдений. Поскольку эффективные осадки, усваиваемые корнеобитаемым слоем почвы, напрямую вычитаются из потребности культур в воде при определении оросительной нормы, расхождения в данных об осадках имеют наиболее существенное практическое значение: систематическое занижение осадков приводит к пропорциональному завышению расчётной оросительной нормы.

3.5. Оценка возможности использования данных реанализа AgERA5 для расчёта режимов орошения

Применимость данных реанализа для обоснования режимов орошения существенно различается по агроклиматическим зонам Республики Бурунди и по сезонам года, что определяет дифференцированный, а не универсальный характер использования AgERA5 в последующих расчётах.

Для западной низменности, где расположена относительно плотная сеть метеостанций, приоритетным остаётся использование данных непосредственных наблюдений; данные реанализа целесообразно применять для заполнения пропусков в рядах наблюдений и пространственной интерполяции между метеостанциями.

Точность климатических данных имеет разную критичность в разные сезоны года: в сухой сезон (июнь–август), когда осадки минимальны, данные реанализа приемлемы для практического применения; во влажные сезоны, для которых характерна максимальная изменчивость осадков, точность данных об осадках критична для определения эффективных осадков и оросительных норм, что требует приоритетного использования станционных наблюдений там, где они доступны.

Таким образом, применение реанализа AgERA5 в настоящей работе обосновано не как замена метеорологических наблюдений, а как научно обоснованный способ преодоления пространственных и временных ограничений стационарной сети Бурунди. Этот вывод дважды независимо подтверждён в настоящей главе: первичным сопоставлением по шести метеостанциям и детальной количественной проверкой по метеостанции Бужумбура. Установленные систематические расхождения (занижение температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$, влажности на 7%, осадков на 17–20%) образуют основу для последующего определения поправочных коэффициентов, используемых при формировании климатической базы расчётов режимов орошения.

Выводы к главе 3

1. Сопоставление данных реанализа AgERA5 с наблюдениями шести метеостанций Республики Бурунди подтвердило в целом удовлетворительное соответствие данных при выявленных систематических расхождениях: занижение температуры воздуха на $0,5^{\circ}\text{C}$, относительной влажности – на 7%, суммарных осадков – на 17–20%. Наилучшее соответствие получено для пунктов Бужумбура (аэропорт) и Ньянза-Лак, вблизи стабилизирующего влияния озера Танганьика.
2. Пространственный анализ изменения среднегодовой температуры за 1991–2020 гг. выявил территориальную неоднородность потепления (от $+0,3$ – $0,4^{\circ}\text{C}$ у озера Танганьика до $+0,8$ – $0,9^{\circ}\text{C}$ на центральном плато), при этом равнина Имбо, основной регион орошаемого земледелия страны, характеризуется повышенными темпами потепления, что требует дифференцированного по агроклиматическим зонам подхода к планированию режимов орошения.
3. Систематическое занижение реанализом суммарных осадков на 17–20% имеет наибольшее практическое значение для обоснования режимов орошения, поскольку приводит к пропорциональному завышению расчётной оросительной нормы; занижение относительной влажности на 7% приводит к завышению расчётной эвапотранспирации на 8–10%, что критично при определении поливных норм в сухой сезон.

4. Применимость данных реанализа AgERA5 дифференцирована по территории и по сезонам: в регионах с плотной сетью метеостанций и в периоды высокой изменчивости осадков (влажные сезоны) приоритет сохраняется за станционными наблюдениями; в удалённых от станций регионах и в сухой сезон, когда осадки минимальны, использование AgERA5 обосновано и допустимо. Реанализ AgERA5 применяется не взамен метеорологических наблюдений, а как научно обоснованное средство преодоления пространственной разреженности и неполноты станционной сети Бурунди.
5. Установленные в настоящей главе систематические расхождения между AgERA5 и данными наблюдений образуют основу для определения поправочных коэффициентов и формирования верифицированной климатической базы, используемой при расчёте дифференцированных по типам почв режимов орошения кукурузы методом FAO CROPWAT 8.0 и математической моделью влагопереноса А.И. Голованова.

ГЛАВА 4. РАСЧЁТ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ В УСЛОВИЯХ РЕГИОНА ИМБО РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ ПО МЕТОДИКЕ ФАО

4.1. Последовательность расчёта режима орошения по FAO CROPWAT 8.0

Расчёт режима орошения сводится к определению трёх величин: оросительной нормы ($\text{м}^3/\text{га}$ за сезон), поливной нормы ($\text{м}^3/\text{га}$ за один полив) и сроков поливов. В настоящей работе применён расчётно-балансовый метод, основанный на решении уравнения водного баланса корнеобитаемого слоя и реализованный в программном комплексе FAO CROPWAT 8.0.

Оросительная норма O_p (мм, $\text{м}^3/\text{га}$) определяется из уравнения

$$O_p = K_c \cdot ET_0 - P_{эф} \pm g, \quad (4.1)$$

где K_c – коэффициент культуры по фазам вегетации, ET_0 – эталонная эвапотранспирация, $P_{эф}$ – эффективные осадки, g – величина водообмена с подстилающими грунтами и грунтовыми водами.

Поливная норма M (мм, $\text{м}^3/\text{га}$) определяется как

$$M = 100 \cdot h \cdot \rho (\omega_{НВ} - \omega_1), \quad (4.2)$$

где h – глубина увлажнения, ρ – плотность почвы, $\omega_{НВ}$ – влажность при наименьшей влагоёмкости, ω_1 – предполивная влажность.

Эталонная эвапотранспирация ET_0 рассчитывается по методу Пенмана–Монтейта [49, 112, 128]:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T+273}\gamma u_2 \delta e}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)}, \quad (4.3)$$

где ET_0 – эталонная эвапотранспирация ($\text{мм}/\text{сут}$), Δ – угловой коэффициент кривой зависимости давления, насыщенного водяного пара от температуры ($\text{кПа}/^\circ\text{C}$), R_n – суммарный радиационный баланс поверхности ($\text{МДж}/\text{м}^2/\text{сут}$), G – плотность потока тепла в почву ($\text{МДж}/\text{м}^2/\text{сут}$), T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м ($^\circ\text{C}$), u_2 – скорость ветра на высоте 2 м ($\text{м}/\text{с}$), δe – дефицит давления водяного пара (кПа), γ – психрометрическая постоянная ($\text{кПа}/^\circ\text{C}$).

Наряду с методом Пенмана–Монтейта для расчёта эталонной эвапотранспирации в литературе используются и более простые эмпирические методы – уравнение Хагривса [93] и метод Пристли–Тейлора [129], требующие

меньшего набора исходных метеоданных, но уступающие методу Пенмана–Монтейта в точности при наличии полного комплекта наблюдений [50]. Поскольку для метеостанции Бужумбура доступен полный набор необходимых параметров, в настоящей работе применён именно метод Пенмана–Монтейта как наиболее точный и рекомендованный ФАО.

Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) разработала методологию моделирования орошения сельскохозяйственных культур, реализуемую через программный комплекс CROPWAT, который обеспечивает систематический подход к оценке водопотребления растений и определению ирригационных потребностей [137, 77, 78].

Методологический подход CROPWAT включает: расчёт эталонной эвапотранспирации ET_0 по методу Пенмана–Монтейта (FAO-56); определение потребности культуры в воде $ET_c = ET_0 \times K_c$; расчёт потребности в орошении $IR = ET_c - P_{эф}$; планирование орошения на основе ежедневного водопотребления, состояния влажности почвы и глубины корнеобитаемого слоя. Алгоритм и блок-схема расчётов представлены на рисунке 4.1 и рисунок 4.2.

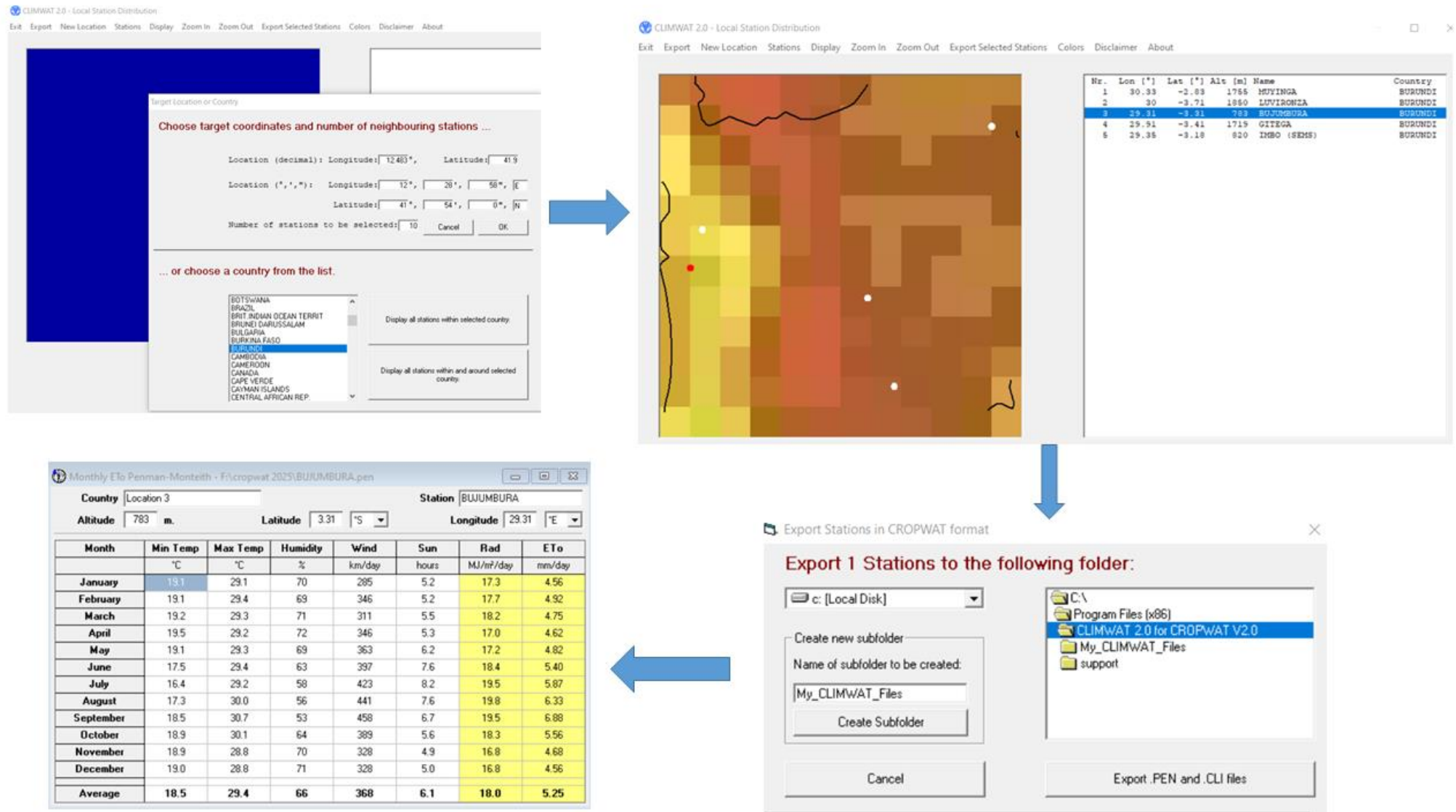


Рисунок 4.1 – Последовательность расчётов, выполненных в CROPWAT.

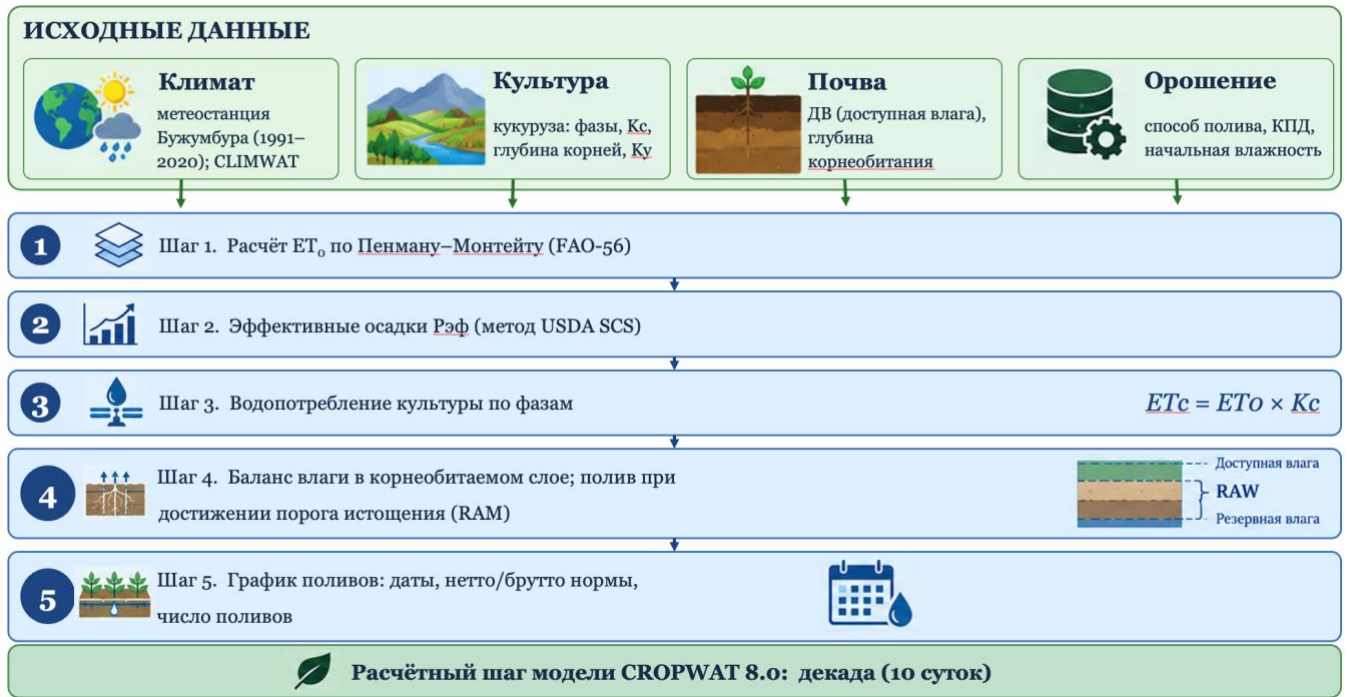


Рисунок 4.2 – Блок-схема расчёта режима орошения кукурузы по методике FAO (программа CROPWAT 8.0).

Блок-схема детализирует последовательность расчёта: ввод климатических данных станции Бужумбура и параметров культуры → расчёт ET_0 по методу Пенмана–Монтейта → расчёт водопотребления кукурузы $ET_c = K_c \cdot ET_0$ по декадам → расчёт эффективных осадков методом USDA Soil Conservation Service → определение дефицита водопотребления → назначение сроков и норм поливов по критерию исчерпания диапазона доступной влаги → формирование итогового графика орошения. Применение данной методологии для условий Республики Бурунди обеспечивает научно обоснованный подход к организации орошения кукурузы с учётом локальных климатических особенностей и почвенных характеристик.

4.2. Параметризация расчёта для природных условий трех фаций ландшафтной катены реки Русизи в Регионе Имбо

Обоснование выбора конкретных исходных параметров расчёта, представленное ниже, составляет самостоятельный этап настоящего исследования, выполненный на основе общей методики FAO CROPWAT 8.0.

Для расчёта водопотребления кукурузы использованы климатические данные метеостанции BUJUMBURA (3,31° ю.ш., 29,31° в.д., высота 783 м над уровнем моря). Анализ этих данных позволяет охарактеризовать климатические условия региона исследования как тропические, с выраженными сезонами (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Климатические параметры региона исследования (BUJUMBURA)

Месяц	Минимальная температура, °C	Максимальная температура, °C	Относительная влажность, %	Ветер, м/с	Продолжительность солнечного сияния, ч	Радиация, МДж/м²/сут	ET ₀ , мм/сут
Январь	19,4	29,4	73	2,0	5,2	17,4	4,08
Февраль	20,1	31,2	70	1,7	5,2	17,7	4,32
Март	19,6	29,3	75	2,2	5,5	18,1	4,24
Апрель	19,4	29,3	74	2,2	5,3	17,0	4,04
Май	19,1	30,4	70	2,4	6,2	17,2	4,29
Июнь	17,8	30,0	66	2,3	7,6	18,4	4,44
Июль	17,1	29,4	61	2,9	8,2	19,5	4,95
Август	19,1	29,2	64	3,0	7,6	19,9	4,99
Сентябрь	19,1	30,0	68	2,4	6,7	19,6	4,75
Октябрь	18,7	30,3	68	2,6	5,6	18,2	4,71
Ноябрь	19,1	28,8	75	2,1	4,9	16,9	3,95
Декабрь	19,2	29,2	75	2,1	5,0	16,8	3,96
Среднее	19,0	29,7	70	2,3	6,1	18,1	4,39

Данные таблицы показывают, что температурный режим относительно стабилен в течение года (минимальная температура 16,4–19,5°C, максимальная 28,8–30,7°C), тогда как относительная влажность демонстрирует более значительные колебания (от 53% в сентябре до 72% в апреле). Скорость ветра увеличивается в сухой сезон, достигая максимума в сентябре; интенсивность солнечной радиации максимальна в июле–августе. Эталонная эвапотранспирация (ET₀) достигает наибольших значений в период с июня по октябрь (5,40–6,88 мм/день), что совпадает с сухим сезоном и создаёт благоприятные условия для орошения.

Для определения эффективных осадков были рассмотрены различные методы, представленные в CROPWAT 8.0. Сравнительный анализ показал, что метод Службы охраны почв США (USDA S.C. Method) обеспечивает наиболее достоверные результаты для условий Бурунди (таблица 4.2) в силу адаптивности к локальным условиям тропического климата с выраженной сезонностью осадков, комплексного учёта принципов охраны водных ресурсов и эффективности их использования, баланса между сельскохозяйственными потребностями и экологической устойчивостью (что особенно значимо для развивающихся стран с ограниченными водными ресурсами), а также учёта влагоудерживающей способности почвы.

Таблица 4.2 – Расчёт эффективных осадков

Месяц	Осадки, мм	Эффективные осадки, мм
Январь	65,8	58,9
Февраль	13,9	13,6
Март	147,1	112,5
Апрель	92,5	78,8
Май	25,3	24,3
Июнь	0,3	0,3
Июль	4,5	4,5
Август	30,3	28,8
Сентябрь	60,1	54,3
Октябрь	48,2	44,5
Ноябрь	128,3	102,0
Декабрь	159,6	118,8
Итого	775,9	641,2

Из таблицы видно, что в период с июня по сентябрь (сухой сезон) эффективные осадки минимальны (3,0–32,2 мм/месяц), что и обосновывает необходимость орошения кукурузы именно в этот период; за пределами сухого сезона (март, ноябрь, декабрь) эффективные осадки превышают 100 мм/месяц и способны самостоятельно обеспечить культуру влагой.

Для расчёта водопотребления кукурузы определены ключевые параметры развития культуры (таблица 4.3): продолжительность фенологических фаз, коэффициенты культуры (K_c) для каждой фазы, глубина корнеобитаемого слоя и коэффициенты реакции на водный стресс.

Таблица 4.3 – Параметры развития кукурузы (посев 01.07, уборка 28.10)

Параметр	Начальная фаза	Фаза развития	Средняя фаза	Поздняя фаза
Продолжительность, сутки	15	35	60	30
K_c (коэффициенты культуры)	0,15	0,15 → 1,15	1,15	0,15
Мощность увлажняемого горизонта, м	0,30	0,30 → 1,00	1,00	1,00
Критическое истощение, доля от TAW (диапазон доступной воды)	0,55	0,55	0,55	0,80
Фактор реакции урожайности	0,40	0,40	1,30	0,50

Динамика коэффициента культуры (K_c) отражает физиологические особенности развития кукурузы по фазам вегетации, что необходимо учитывать при агрономическом обосновании сроков и норм полива.

Начальная фаза (15 суток, $K_c = 0,15$) охватывает набухание семени, прорастание и появление всходов; растительный покров минимален, испарение с открытой поверхности почвы преобладает над транспирацией растений, чем и объясняется низкое суммарное водопотребление в этот период.

Фаза развития (35 суток, K_c растёт от 0,15 до 1,15) соответствует интенсивному вегетативному росту – развитию листового аппарата, удлинению стебля (трубкованию) и быстрому нарастанию проективного покрытия почвы от начальных значений практически до полного смыкания рядков, чем и объясняется резкий рост K_c в этот период.

Средняя фаза (60 суток, $K_c = 1,15$) охватывает выбрасывание метёлки, цветение (выметывание нитей початка) и налив зерна – период максимального

проективного покрытия и, соответственно, максимального суточного водопотребления культуры; именно на эту фазу приходится и максимальное значение фактора реакции урожайности ($K_y = 1,30$), что указывает на наибольшую чувствительность кукурузы к дефициту влаги в период цветения и формирования зерна.

Поздняя фаза (30 суток, K_c снижается до 0,15) соответствует созреванию – молочной, восковой и полной спелости зерна, началу физиологического старения (пожелтению и отмиранию листьев) и постепенному снижению водопотребления по мере подсыхания растения.

Соответствие укрупнённых фаз конкретным фенологическим стадиям кукурузы показано на рисунке 4.3: начальная фаза объединяет стадии набухания, прорастания и всходов; фаза развития – развитие листьев и трубкование; средняя фаза – выбрасывание метёлки, цветение и налив зерна (молочная спелость); поздняя фаза – полную спелость.

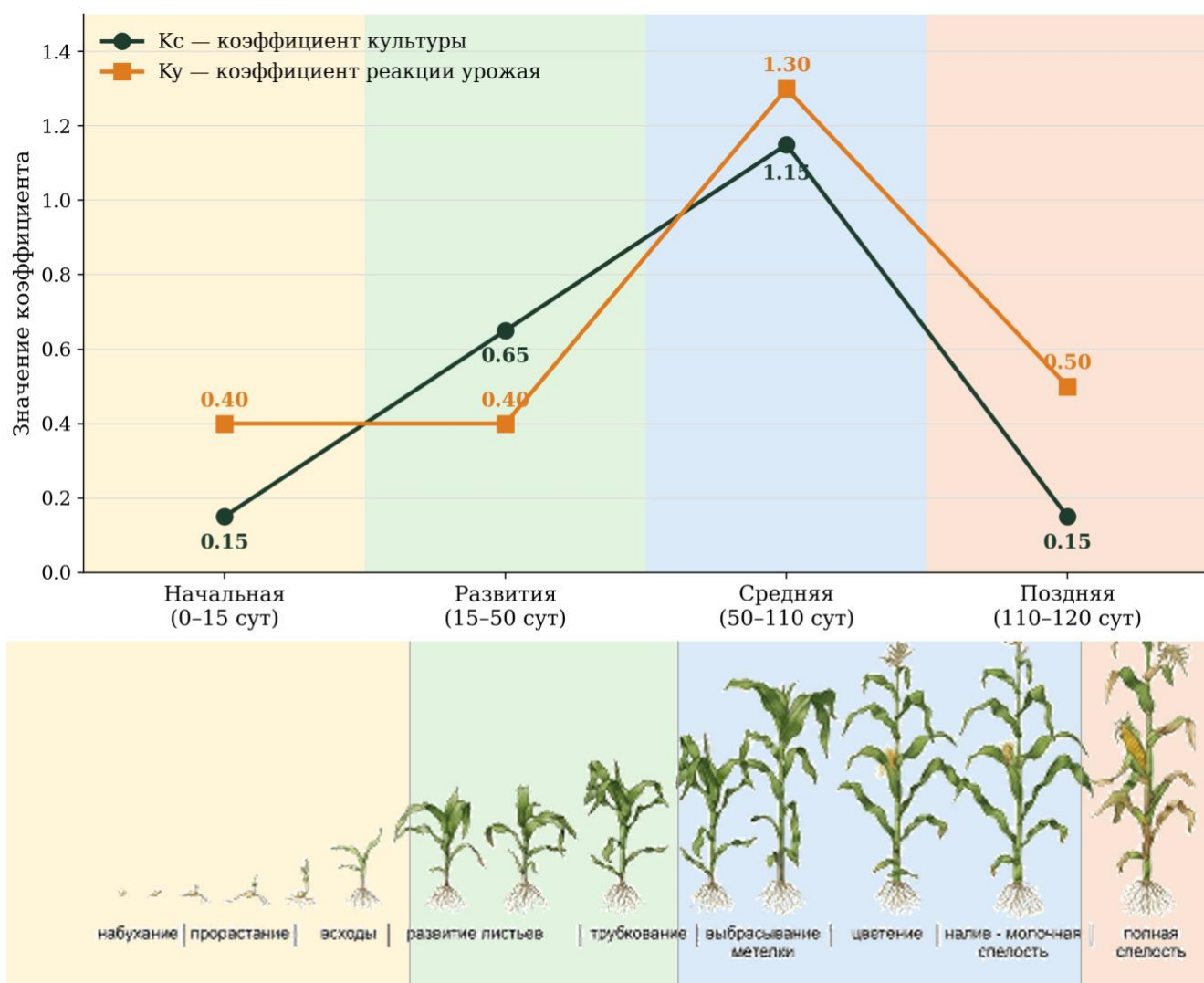


Рисунок 4.3 – Фенологические параметры кукурузы по фазам вегетации (FAO-56 [49]).

Метод Пенмана–Монтейта FAO-56 обеспечивает надёжный расчёт эталонной эвапотранспирации ET_0 . Потребность в орошении ($ПО = 312$ мм) одинакова для всех трёх участков катены, так как определяется климатом региона, единым для всех участков.

В расчёте использованы три типа почв, соответствующие трём расчётным участкам ландшафтной катены региона Имбо: солончаки глеевые (Solonchaks, SCgl, участок I), глейсоли молликовые (Gleysols, GLmo, участок II) и камбисоли дистрические (Cambisols, CMdy, участок III) (таблица 4.4).

Диапазон продуктивных влагозапасов (TAW) существенно различается по участкам: 120 мм/м на участках I (солончаки) и II (глейсоли) против 80 мм/м на участке III (камбисоли), что определяется гранулометрическим составом и

структурой почвенного профиля. Начальная величина доступной влаги к моменту посева также дифференцирована: 54 мм/м на участке I, 60 мм/м на участке II и лишь 40 мм/м на участке III. Именно наименьший запас доступной влаги на участке III обуславливает, как показано далее, наиболее частые поливы на этом участке.

Таблица 4.4 – Характеристика почвенных условий

Параметр	Участок I	Участок II	Участок III
Тип почвы	Solonchaks (SCgl)	Gleysols (GLmo)	Cambisols (CMdy)
ТАW (ПВ-ВЗ), мм/метр	120	120	80
Глубина увлажняемого слоя, см	60	60	60
Начальная влажность почвы, %	55	50	50
Нач. величина доступной влаги, мм/метр	54	60	40

4.3. Результаты расчёта водопотребления и режимов орошения по типам почв

На основе установленных параметров выполнен расчёт водопотребления кукурузы по декадам вегетационного периода (таблица 4.5) с использованием программы CROPWAT 8.0 на основе метода Пенмана–Монтейта.

Суммарное водопотребление составляет $ET_c = 434,8$ мм, из которых эффективными осадками обеспечивается 127,2 мм (29,2% от ET_c), что определяет расчётную потребность в орошении около 312 мм. Кривая ET_c нарастает от минимальных значений в начальной фазе, достигает максимума в средней фазе ($K_c \approx 1,15$) и снижается к моменту созревания; кривая ET_0 отражает сезонный ход испаряемости и убывает к концу сухого сезона (октябрь) (рисунок 4.4).

Таблица 4.5 – Потребность кукурузы в воде по декадам вегетационного периода

Месяц	Декада	Фаза	K_c	ET_c , мм/сут	ET_s , мм/дек	Эффективные осадки, мм/дек	Потребность в орошении, мм/дек
Июль	1	Начальная	0,15	0,72	7,2	0,4	6,7
Июль	2	Развитие	0,19	0,95	9,5	0,6	8,9
Июль	3	Развитие	0,46	2,29	25,2	3,6	21,6
Август	1	Развитие	0,76	3,78	37,8	6,9	30,9
Август	2	Средняя	1,04	5,20	52,0	9,6	42,4
Август	3	Средняя	1,14	5,61	61,8	12,4	49,3
Сентябрь	1	Средняя	1,14	5,52	55,2	16,4	38,8
Сентябрь	2	Средняя	1,14	5,43	54,3	19,8	34,5
Сентябрь	3	Поздняя	1,13	5,36	53,6	18,1	35,5
Октябрь	1	Поздняя	0,89	4,22	42,2	13,8	28,4
Октябрь	2	Поздняя	0,56	2,65	26,5	11,7	14,8
Октябрь	3	Поздняя	0,27	1,18	9,5	13,9	0,0
Итого					434,8	127,2	312,0

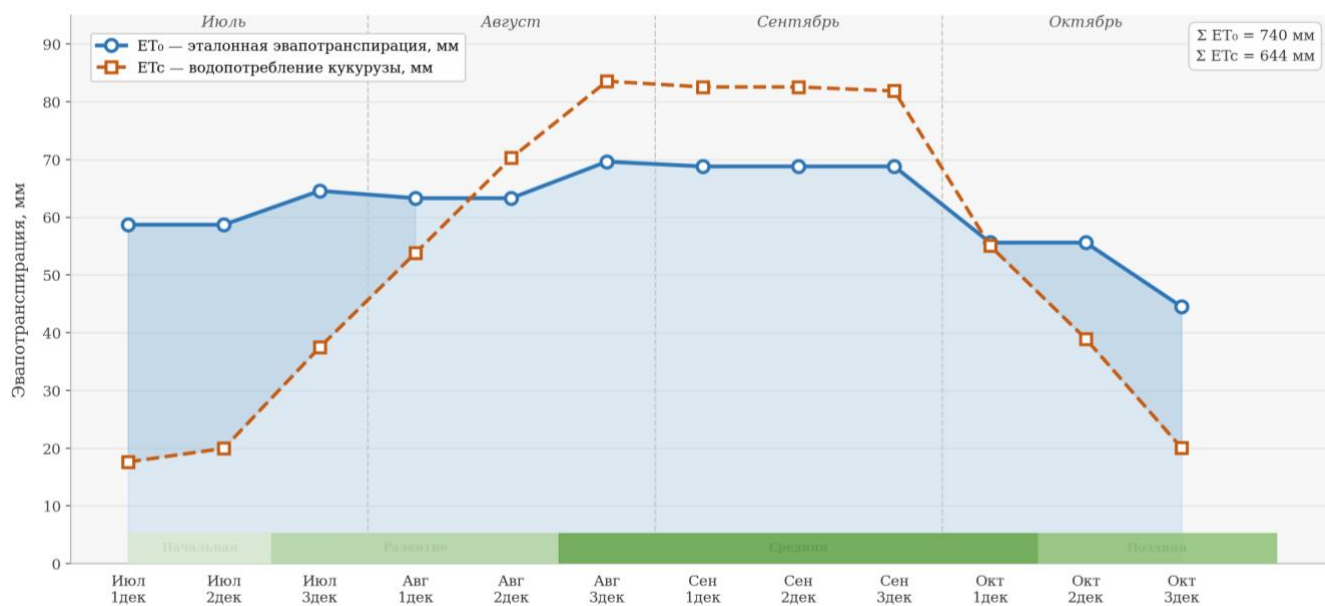


Рисунок 4.4 – По методике FAO (CROPWAT 8.0) – ET_0 (испаряемость) и ET_c (водопотребление кукурузы) по декадам, мм/сут (ст. Бужумбура).

На основе расчёта водопотребления и анализа почвенно-климатических условий разработан оптимальный график поливов кукурузы, дифференцированный по трём расчётным участкам (таблица 4.6–4.8). TAW (Total Available Water) – общая доступная влага в корнеобитаемом слое; истощение приведено в процентах от TAW на дату очередного полива.

Участок I (солончаки глеевые, SCgl). Расчёт показал 8 поливов с постоянной нормой 38 мм нетто (42,2 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 1 июля в связи с начальным дефицитом почвенной влаги (57% TAW). Интервалы между поливами варьируют от 9 до 27 суток: наибольшие значения характерны для начальной фазы, наименьшие – для средней, совпадающей с максимальными значениями ET_c . Суммарная оросительная норма нетто составила 304,0 мм, брутто – 337,8 мм; потери незначительны (6,3 мм); эффективность графика орошения – 97,9% (таблица 4.6, рисунок 4.5).

Таблица 4.6 – Режим орошения кукурузы – участок I (солончаки глеевые, SCgl)

Дата	Фаза	K_s	ET_a , %	Истощение, %	Нетто, мм	Брутто, мм	Расход, л/с/га
1 июля	Начальная	1,00	100	57	38,0	42,2	4,89
28 июля	Развитие	1,00	100	55	38,0	42,2	0,18
10 авг.	Развитие	1,00	100	57	38,0	42,2	0,38
20 авг.	Средняя	1,00	100	58	38,0	42,2	0,49
29 авг.	Средняя	1,00	100	57	38,0	42,2	0,54
8 сент.	Средняя	1,00	100	56	38,0	42,2	0,49
19 сент.	Средняя	1,00	100	59	38,0	42,2	0,44
30 сент.	Поздняя	1,00	100	61	38,0	42,2	0,44
	Итого				304,0	337,8	

Итого: нетто 304,0 мм; брутто 337,8 мм; потери 6,3 мм; эффективные осадки за период 143,2 мм; КПД техники полива 90%; эффективность графика орошения 97,9%.

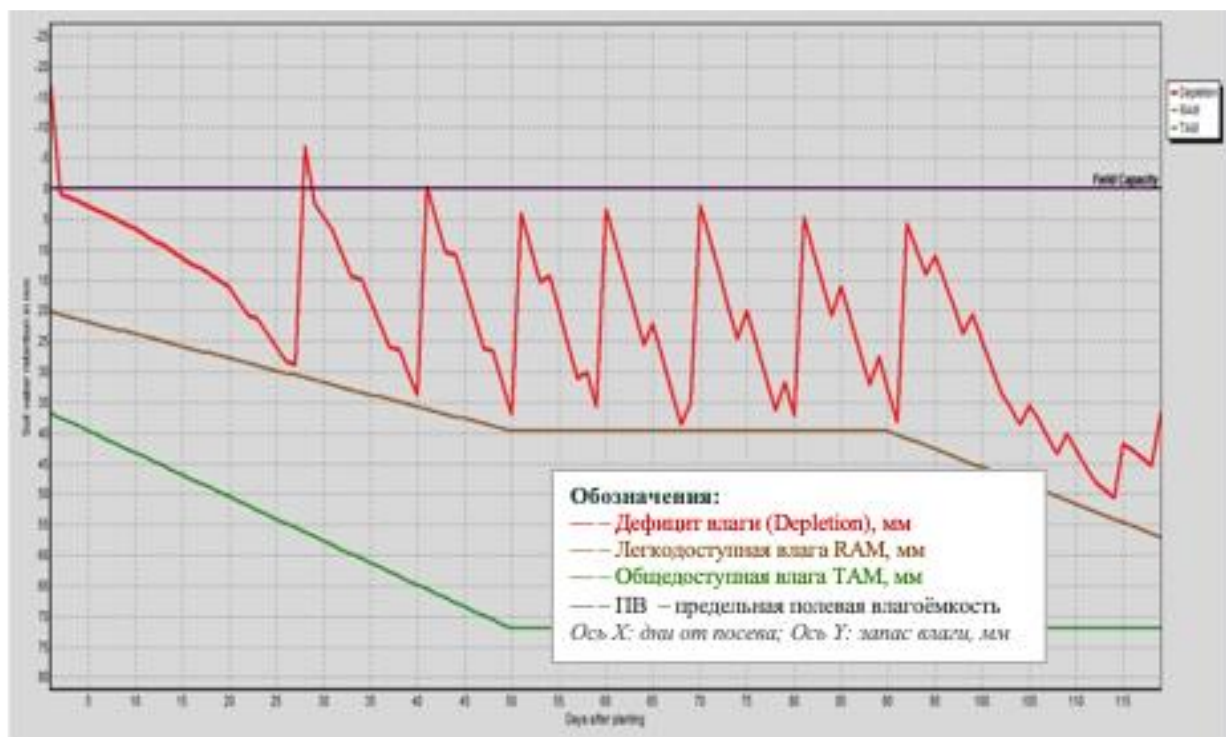


Рисунок 4.5 – Режим орошения кукурузы – Уч. I Солончаки глеевые (SCgl) (CROPWAT).

Участок II (глейсоли молликовые, GLmo). Расчёт показал 11 поливов с постоянной нормой 35 мм нетто (38,9 мм брутто). Первый полив назначен на 3 июля при истощении 55% TAW. Суммарная оросительная норма нетто составила 385,0 мм, брутто – 427,8 мм; потери минимальны (1,2 мм) вследствие малой скорости фильтрации почвы; эффективность графика орошения – 99,7%, наивысшая среди трёх участков (таблица 4.7, рисунок 4.6).

Таблица 4.7 – Режим орошения кукурузы – участок II (глейсоли молликовые, GLmo)

Дата	Фаза	K_s	ET_a , %	Истощение, %	Нетто, мм	Брутто, мм	Расход, л/с/га
3 июля	Начальная	1,00	100	55	35,0	38,9	1,50
29 июля	Развитие	1,00	100	57	35,0	38,9	0,17
10 авг.	Развитие	1,00	100	59	35,0	38,9	0,38
18 авг.	Развитие	1,00	100	58	35,0	38,9	0,56
25 авг.	Средняя	1,00	100	59	35,0	38,9	0,64
1 сент.	Средняя	1,00	100	62	35,0	38,9	0,64

Дата	Фаза	K _s	ET _a , %	Истощение, %	Нетто, мм	Брутто, мм	Расход, л/с/га
8 сент.	Средняя	1,00	100	62	35,0	38,9	0,64
14 сент.	Средняя	1,00	100	56	35,0	38,9	0,75
21 сент.	Средняя	1,00	100	57	35,0	38,9	0,64
29 сент.	Поздняя	1,00	100	62	35,0	38,9	0,56
9 окт.	Поздняя	1,00	100	68	35,0	38,9	0,45
	Итого				385,0	427,8	

Итого: нетто 385,0 мм; брутто 427,8 мм; потери 1,2 мм; эффективные осадки за период 143,2 мм; КПД техники полива 90%; эффективность графика орошения 99,7%.

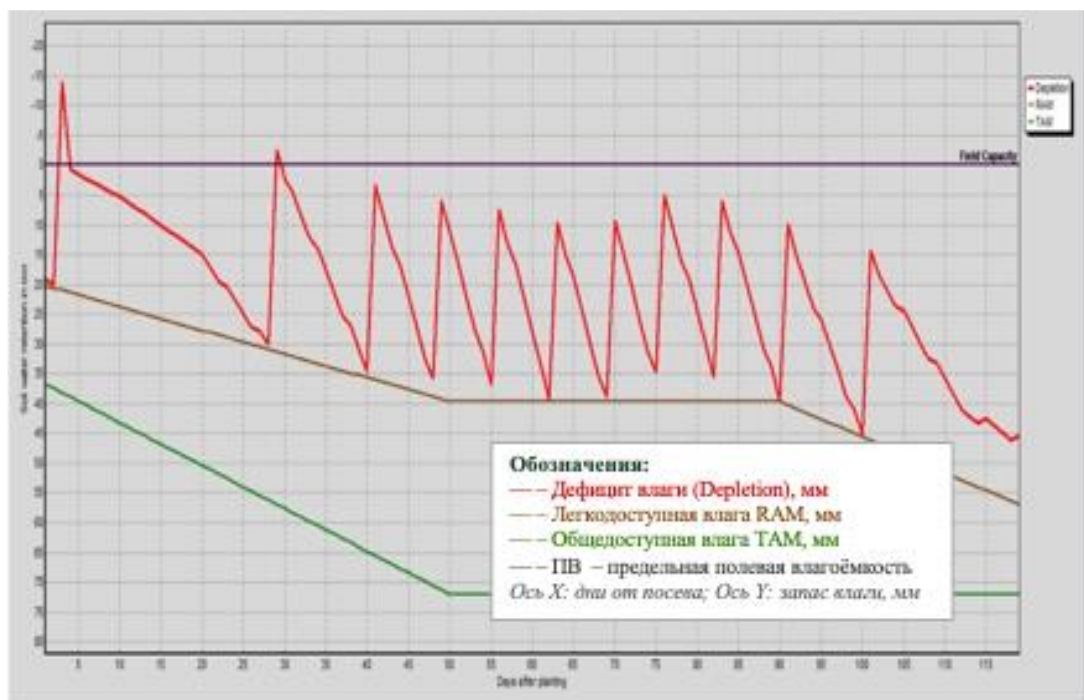


Рисунок 4.6 – Режим орошения кукурузы – Уч. II Глейсоли молликовые (GLmo) (CROPWAT).

Участок III (камбисоли дистрические, CMdy). Расчёт показал 14 поливов с постоянной нормой 32 мм нетто (35,6 мм брутто). Первый полив назначен на 2 июля при истощении 56% TAW. Наименьший запас доступной влаги (TAW = 80 мм/м) обуславливает наиболее высокую частоту поливов: интервалы составляют от 5 до 20 суток. Суммарная оросительная норма нетто составила 448,0 мм, брутто – 497,8 мм; потери наибольшие среди участков (64,6 мм) вследствие превышения

интенсивности подачи воды над скоростью впитывания почвы; эффективность графика орошения – 85,6%, наименьшая среди трёх участков (таблица 4.8, рисунок 4.7).

Таблица 4.8 – Режим орошения кукурузы – участок III (камбисоли дистрические, CMdy)

Дата	Фаза	K _s	ЕТа, %	Истощение, %	Нетто, мм	Брутто, мм	Расход, л/с/га
2 июля	Начальная	1,00	100	56	32,0	35,6	2,06
22 июля	Развитие	1,00	100	55	32,0	35,6	0,21
1 авг.	Развитие	1,00	100	57	32,0	35,6	0,41
10 авг.	Развитие	1,00	100	62	32,0	35,6	0,46
16 авг.	Развитие	1,00	100	58	32,0	35,6	0,69
21 авг.	Средняя	1,00	100	55	32,0	35,6	0,82
28 авг.	Средняя	1,00	100	65	32,0	35,6	0,59
2 сент.	Средняя	1,00	100	58	32,0	35,6	0,82
8 сент.	Средняя	1,00	100	61	32,0	35,6	0,69
14 сент.	Средняя	1,00	100	60	32,0	35,6	0,69
20 сент.	Средняя	1,00	100	60	32,0	35,6	0,69
26 сент.	Средняя	1,00	100	59	32,0	35,6	0,69
2 окт.	Поздняя	1,00	100	62	32,0	35,6	0,69
11 окт.	Поздняя	1,00	100	68	32,0	35,6	0,46
	Итого				448,0	497,8	

Итого: нетто 448,0 мм; брутто 497,8 мм; потери 64,6 мм; эффективные осадки за период 107,2 мм; КПД техники полива 90%; эффективность графика орошения 85,6%.

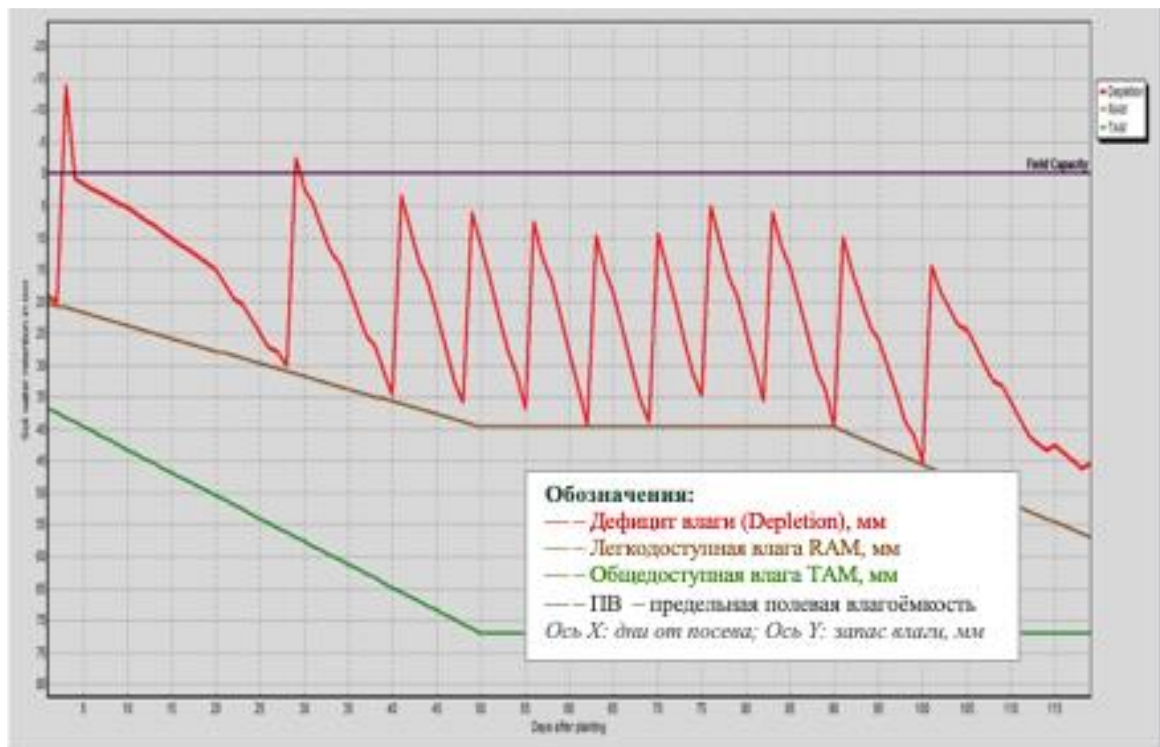


Рисунок 4.7 – Режим орошения кукурузы – Уч. III Камбисоли дистрические (CMdy) (CROPWAT).

Сравнение таблиц 4.6–4.8 показывает, что расход воды на полив (л/с/га) на всех трёх участках максимален в момент первого полива (от 1,50 до 4,89 л/с/га – культура ещё не сформировала корневую систему, а почвенный профиль требует первоначального насыщения), а далее стабилизируется на уровне 0,2–0,8 л/с/га; эта величина определяет требования к производительности насосного оборудования и диаметру подводящих трубопроводов на каждом участке при проектировании оросительной сети.

Сравнительный анализ показывает: идентичность водопотребления ET_c (434,8 мм) и теоретической потребности по CWR (312,0 мм) для всех трёх участков подтверждает, что тип почвы не влияет на расчёт водопотребления культуры как такового – только на формирование графика поливов через параметры TAW, коэффициента фильтрации и глубины корнеобитаемого слоя. Различия в оросительных нормах брутто между участками (от 337,8 мм на участке I до 497,8 мм на участке III) определяются в данной методике главным образом величиной TAW: участок III демонстрирует наибольшую брутто-норму вследствие низкого TAW и, как следствие, высокой частоты поливов и значительных суммарных

потерь; участок II характеризуется наиболее высокой эффективностью графика орошения (99,7%) благодаря минимальным инфильтрационным потерям при высоком TAW (рисунок 4.8).

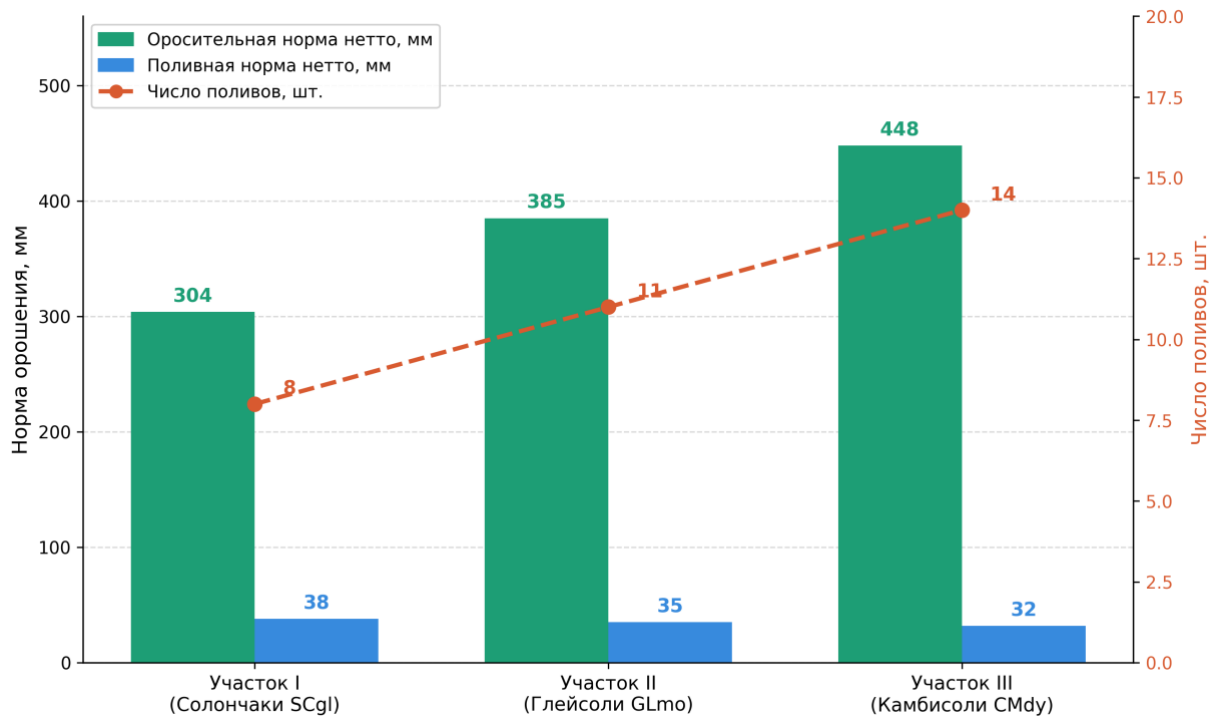


Рисунок 4.8 – Оросительная норма нетто (мм), поливная норма нетто (мм) и число поливов (шт.) для трёх типов почв агроклиматического региона Имбо Республики Бурунди.

Диаграмма наглядно показывает обратную зависимость между поливной нормой и числом поливов: чем меньше поливная норма нетто (32 мм на участке III против 38 мм на участке I), тем больше требуется поливов (14 против 8) для набора той же суммарной оросительной нормы, что типично для почв с низким TAW.

4.4. Практические рекомендации по проектированию режима орошения кукурузы

Предложенный режим орошения кукурузы обеспечивает оптимальное увлажнение в течение всего вегетационного периода, что подтверждается следующими показателями: коэффициент водного стресса (K_s) равен 1,00 на протяжении всего периода вегетации на всех трёх участках, что указывает на отсутствие водного дефицита; фактическая эвапотранспирация (ET_a) составляет 100% от потенциальной; истощение почвенной влаги не превышает критического

уровня (55–68%), что обеспечивает доступность влаги для растений без создания анаэробных условий в почве. Максимальные нормы поливов приходятся на критические фазы водопотребления (средняя и начало поздней фазы), что обеспечивает формирование высокого урожая. При полном удовлетворении потребности кукурузы в воде ($K_s = 1,00$) и соблюдении прочих элементов агротехники расчётная урожайность зерна кукурузы на орошении может достигать 8–11 т/га.

На основе проведённых расчётов сформулированы практические рекомендации, дифференцированные по типам почв: для участка I (солончаки, SCgl) – режим 8 поливов нормой 38 мм нетто (эффективность 97,9%) с рекомендацией дождевания или капельного орошения и регулярным контролем солеобменных процессов, а также рассмотрением более частых поливов с меньшей нормой для предотвращения подъёма уровня солоноватых грунтовых вод; для участка II (глейсоли, GLmo) – режим 11 поливов нормой 35 мм нетто (эффективность 99,7%, наивысшая) с рекомендацией бороздкового орошения или дождевания малой интенсивности для предотвращения поверхностного стока на трансаллювиальной фации; для участка III (камбисоли, CMdy) – режим 14 поливов нормой 32 мм нетто является вынужденным, поскольку при низком ТАВ (80 мм/м) и глубине корнеобитаемого слоя 60 см более редкие поливы невозможны без водного стресса культуры, что требует мер по минимизации потерь воды (64,6 мм) при проектировании оросительной сети.

Планирование вегетационного периода с 1 июля по 28 октября обеспечивает совпадение максимального водопотребления (средняя фаза, август–сентябрь) с наиболее жарким периодом при надёжном обеспечении орошением; установка датчиков влажности на глубине 20–40 см позволит корректировать расчётный режим орошения с учётом фактических условий увлажнения на каждом из трёх участков.

Выводы по главе 4

Расчёт потребности в воде кукурузы и режима орошения методом FAO CROPWAT 8.0 выполнен для трёх расчётных участков ландшафтной катены региона Имбо с различными типами почв (солончаки глеевые SCgl, глейсоли молликовые GLmo, камбисоли дистрические CMdy). Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Суммарное водопотребление кукурузы ET_c за вегетационный период (01.07–28.10, 120 суток) составило 434,8 мм; эффективные осадки – 127,2 мм (29,2%); теоретическая потребность в орошении по методу CWR – 312,0 мм. Данные значения одинаковы для всех трёх участков и определяются исключительно климатическими данными и биологическими параметрами культуры, не завися от типа почвы.
2. Режимы орошения существенно дифференцированы по типам почв: участок I (солончаки, TAW = 120 мм/м) – 8 поливов нормой 38 мм нетто, брутто 337,8 мм, эффективность графика орошения 97,9%; участок II (глейсоли, TAW = 120 мм/м) – 11 поливов нормой 35 мм нетто, брутто 427,8 мм, эффективность графика орошения 99,7%; участок III (камбисоли, TAW = 80 мм/м) – 14 поливов нормой 32 мм нетто, брутто 497,8 мм, эффективность графика орошения 85,6%.
3. Наибольшая брутто-норма на участке III (камбисоли, 497,8 мм) обусловлена сочетанием низкого TAW (80 мм/м) и малой глубины корнеобитаемого слоя, что приводит к высокой частоте поливов и значительным потерям воды (64,6 мм). Наиболее высокая эффективность графика орошения достигается на участке II (глейсоли) – 99,7% вследствие минимальных инфильтрационных потерь.
4. На протяжении всего вегетационного периода на всех трёх участках коэффициент водного стресса $K_s = 1,00$, фактическая эвапотранспирация ET_a соответствует 100% потенциальной – разработанные режимы орошения полностью обеспечивают потребности кукурузы в воде, снижения урожайности по всем трём участкам не прогнозируется; расчётная

урожайность зерна при орошении и соблюдении агротехники оценивается в 8–11 т/га.

5. Методология FAO CROPWAT 8.0 обеспечивает расчёт при корректной параметризации, а также имеет принципиальное ограничение: модель не учитывает водообмен между корнеобитаемым слоем и подстилающими горизонтами, что исключает возможность учёта капиллярного подпитывания при неглубоком залегании грунтовых вод (актуально прежде всего для участка I).
6. Полученные результаты подтверждают необходимость дифференцированного подхода к проектированию систем орошения в агроклиматическом регионе Имбо с учётом гидрофизических свойств конкретных типов почв и могут быть использованы при разработке региональных программ развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди.

ГЛАВА 5. РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА А.И. ГОЛОВАНОВА

5.1. Обоснование выбора и теоретические основы модели А.И. Голованова

Обоснование режима орошения по балансовым методикам, ограничивающимся сопоставлением прихода и расхода влаги за расчётный период, не позволяет учесть внутреннюю динамику влагозапасов и взаимное влияние статей баланса, а также водообмен между корнеобитаемым слоем и подстилающими его грунтами и грунтовыми водами. Для расчёта режима орошения кукурузы на трёх участках ландшафтной катены региона Имбо в настоящей работе применена математическая модель влагопереноса, разработанная А.И. Головановым [6, 8, 9, 11], учитывающая генетическое строение почвы и различия водно-физических свойств отдельных горизонтов. Модель позволяет рассчитывать передвижение влаги в широком диапазоне влагонасыщенности с учётом фактического графика осадков, переменного во времени испарения с поверхности почвы, отбора влаги корнями на транспирацию и заданного графика поливов.

Почва в пределах каждого генетического горизонта принимается гомогенным пористым пространством. Для полевых культур со сплошным растительным покровом и практически однородной по горизонтали корневой массой, при поливе дождеванием, рассматриваются только вертикальные потоки влаги.

Объёмный вертикальный поток влаги через 1 м^2 поверхности определяется законом Дарси:

$$q = -k \frac{dH}{dx}, \quad (5.1)$$

где H – напор почвенной влаги, м, при отсчёте от поверхности земли по оси x , направленной вниз:

$$H = -x + \psi, \quad (5.2)$$

где x – гравитационная составляющая напора; ψ – напор, эквивалентный каркасно-капиллярному давлению в зоне неполного насыщения ($\psi \leq 0$) и

гидростатическому давлению в зоне полного насыщения. В зоне полного влагонасыщения под ψ понимается заглубление точки под уровень грунтовых вод: $\psi = x - h_z$, где h_z – глубина грунтовых вод.

Коэффициент влагопроводности k , зависящий от влажности почвы (при полном насыщении $k = k_f$, коэффициенту фильтрации), по А.И. Голованову принят в виде:

$$k = k_f \left(\frac{\omega - \omega_m}{m - \omega_m} \right)^5, \quad (5.3)$$

где ω – объёмная влажность почвы; ω_m – влажность почвы, соответствующая максимальной гигроскопичности; m – пористость.

Основная гидрофизическая характеристика – связь между каркасно-капиллярным потенциалом и влажностью почвы – принята в виде:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega - \omega_m}{m - \omega_m} = \exp \left[- \left(\frac{|\psi|}{\nu h_k} \right)^n \right], \quad (5.4)$$

где h_k – максимальная высота капиллярного поднятия, м;

ν и n – эмпирические безразмерные коэффициенты.

Потенциальное суммарное испарение E_Σ , определяемое температурой и влажностью воздуха и фазой развития растения, разделяется на испарение с поверхности почвы и транспирацию:

$$E_f^{\text{пот}} = \alpha E_\Sigma, \quad E_{tr}^{\text{пот}} = (1 - \alpha) E_\Sigma, \text{ м/сут}, \quad (5.5)$$

где α – доля расходования влаги на испарение с поверхности почвы от суммарного при высокой влажности верхнего слоя; в период вегетации лежит в пределах 0,1–0,5, во вневегетационный период равна единице.

Иссушение верхнего слоя почвы учитывается коэффициентом ε_ω :

$$E_f = \varepsilon_\omega \cdot E_f^{\text{пот}}, \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_\omega = 2\bar{\omega} - \bar{\omega}^2, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega - \omega_m}{0,8m - \omega_m}, \text{ при } \omega \geq 0,8m: \varepsilon_\omega = 1, \quad (5.7)$$

то есть заметное снижение испарения начинается при влажности почвы у поверхности, равной 0,8 пористости.

Реальная транспирация:

$$E_{tr} = \varepsilon'_{\omega} \cdot E_{tr}^{\text{пот}}, \quad (5.8)$$

$$\varepsilon'_{\omega} = 2\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_1^2, \quad \bar{\omega}_1 = \frac{\omega - \text{ВЗ}}{\omega_{\text{min}} - \text{ВЗ}}; \text{ при } \bar{\omega}_1 \geq 1: \varepsilon'_{\omega} = 1; \text{ при } \bar{\omega}_1 \leq 0: \varepsilon'_{\omega} = 0, \quad (5.9)$$

где ВЗ – влажность завядания, равная (1,3...1,5) ω_m .

Распределение интенсивности отбора влаги корнями на транспирацию по глубине корнеобитаемого слоя:

$$e_i = \frac{E_{tr}\varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i h_i}, \quad (5.10)$$

$$\varepsilon_i = 2\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_i^2, \quad \bar{\omega}_i = \frac{\omega - \text{ВЗ}}{m_i - \text{ВЗ}}; \text{ при } \bar{\omega}_i < 0: \varepsilon_i = 0, \quad (5.11)$$

где i – номер расчётного слоя, n – число расчётных слоёв в корнеобитаемой зоне. При этом $\sum e_i h_i$ (от $i=1$ до n) = E_{tr} , то есть сумма отбора по всем слоям равна общей транспирации.

Ввиду сильной нелинейности уравнения влагопереноса применён конечно-разностный способ по неявной схеме: толща почвы и подстилающего грунта T разбивается на N слоёв переменной толщины h_i , представленных в виде блоков площадью сечения 1 м², каждый блок характеризуется влажностью ω_i в центре и напором H_i .

Поток влаги из i -го блока в $(i+1)$ -й, через фильтрационное сопротивление R_i :

$$q_i = \frac{H_i - H_{i+1}}{R_i}, \quad (5.12)$$

$$R_i = R'_i + R''_i = 0,5 \left(\frac{h_i}{k_i} + \frac{h_{i+1}}{k_{i+1}} \right), \quad (5.13)$$

где коэффициенты влагопроводности k_i , k_{i+1} определяются по (5.3) для влажности, полученной линейной аппроксимацией эпюры между центрами блоков:

$$\omega'_i = \omega_i + 0,5 h_i \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{h_i + h_{i+1}}. \quad (5.14)$$

Баланс влаги в i -м блоке за шаг времени Δt (с явным указанием временных слоёв j и $j+1$ при неявной схеме):

$$(\omega_i^{j+1} - \omega_i^j) h_i = \Delta t (q_{i-1}^{j+1} + q_i^{j+1} - e_i^j h_i), \quad (5.15)$$

или, после подстановки (5.12) и деления на h_i :

$$\frac{\omega_i^{j+1} - \omega_i^j}{\Delta t} = \frac{H_{i-1}^{j+1} - H_i^{j+1}}{h_i R_{i-1}} - \frac{H_i^{j+1} - H_{i+1}^{j+1}}{h_i R_i} - e_i^j. \quad (5.16)$$

Поскольку уравнение содержит две искомые величины, ω и H , а решение ведётся относительно напоров, приращение влажности выражается через приращение напора на предыдущей итерации $\hat{i}$:

$$\omega_i^{j+1} = \omega_0^{\hat{i}} + \frac{\omega_0^{\hat{i}+1} - \omega_i^j}{H_i^{j+1} - H_i^j} (H_i^{j+1} - H_i^j), \quad (5.17)$$

$$\frac{\omega_i^{\hat{i}+1} - \omega_i^j}{H_i^{j+1} - H_i^j} \cong \sigma_i^{j+1/2} = \frac{\Delta \omega}{\Delta H} = \frac{\Delta \omega}{\Delta \psi}, \quad (5.18)$$

где σ – коэффициент влагоёмкости, определяемый дифференцированием ОГХ (5.4):

$$\sigma = n \frac{m - \omega_m}{v^n h_k^n} \psi^{n-1} \exp \left[- \left(\frac{\psi}{v h_k} \right)^n \right], \quad (5.19)$$

или, через влажность:

$$\sigma = n \frac{\omega - \omega_m}{v h_k} \left\{ \ln \left[- \left(\frac{1}{\bar{\omega}} \right) \right] \right\}^{\frac{n-1}{n}}, \quad (5.20)$$

при $n = 1$:

$$\sigma = \frac{(m - \omega_m)}{v h_k}. \quad (5.21)$$

При $\psi > 0$ $\sigma = 0$. Значения ω и H берутся на промежуточный момент $j+1/2$ путём итераций; начиная со второй итерации σ упрощённо определяется как $\sigma_i^{j+1/2} = (\omega_i^{\hat{i}+1} - \omega_i^j) / (H_i^{j+1} - H_i^j)$. С учётом этого основное уравнение переписывается в виде:

$$\sigma_i^{j+1/2} \frac{H_i^{j+1} - H_i^j}{\Delta t} = \frac{H_{i-1}^{j+1} - H_i^{j+1}}{h_i R_{i-1}} - \frac{H_i^{j+1} - H_{i+1}^{j+1}}{h_i R_i} - e_i^j. \quad (5.22)$$

Уравнение (5.22) записывается для $i = 2 \dots N-1$ и решается методом прогонки. В трёхдиагональном виде:

$$\alpha_i H_{i+1}^{j+1} - \beta_i H_i^{j+1} + \gamma_i H_{i-1}^{j+1} = \delta_i, \quad (5.23)$$

где

$$\alpha_i = \frac{1}{h_i R_i}, \quad \gamma_i = \frac{1}{h_i R_{i-1}}, \quad \beta_i = \alpha_i + \gamma_i + \frac{\sigma_i^{j+1/2}}{\Delta t}, \quad \delta_i = e_i^j - \sigma_i^{j+1/2} \frac{H_i^j}{\Delta t}. \quad (5.24)$$

При прямой прогонке:

$$P_i = \frac{\alpha_i}{\beta_i - \gamma_i P_{i-1}}, \quad Q_i = \frac{\gamma_i Q_{i-1} - \delta_i}{\beta_i - \gamma_i P_{i-1}}, \quad (5.25)$$

при обратной – искомые напоры:

$$H_i^{j+1} = P_i H_{i+1}^{j+1} + Q_i. \quad (5.26)$$

Граничное условие на поверхности почвы в межполивной период – поток влаги, равный испарению E_f :

$$E_f^j = -\frac{H_1^{j+1} - H_2^{j+1}}{R_1}, \quad \text{откуда } P_1 = 1, \quad Q_1 = -E_f^j R_1. \quad (5.27)$$

При сплошном затоплении слоем воды h_c : $P_1 = 1$, $H_1^{j+1} = h_c$ (5.28). При дождевании и поливе по бороздам поливы моделируются заданием влажности почвы у поверхности 0,95–0,98 пористости, чему соответствует формальное условие (5.28); атмосферные осадки учитываются мгновенным насыщением верхних блоков в день выпадения, а не потоком через границу.

Условия на нижней границе определяются гидрогеологической обстановкой. При глубоких грунтовых водах (градиент напора равен единице):

$$H_{N-1}^{j+1} - H_N^{j+1} = 0,5 h_{N-1}, \quad \text{откуда } H_N^{j+1} = \frac{Q_{N-1} - 0,5 h_{N-1}}{1 - P_{N-1}}. \quad (5.29)$$

При неглубоком залегании грунтовых вод постоянной глубины h_Γ :

$$H_N^{j+1} = -h_\Gamma. \quad (5.30)$$

Наиболее значимый для мелиоративных расчётов случай – колеблющийся под действием поливов уровень грунтовых вод при устройстве дренажа. На нижней

границе задаётся поток грунтовых вод D , складывающийся из оттока в дрены D_d , фильтрационных потерь из оросительной сети f_k и напорного подпитывания p_H :

$$D_d = D + f_k + p_H, \text{ м/сут}, \quad (5.31)$$

$$D_d = D_0(h_d - h_r), \quad (5.32)$$

где D_0 – модуль дренажного стока при напоре над дренами 1 м. При глубоком залегании водоупора (по А.Н. Костякову):

$$D_0 = \frac{\pi k_f}{B \left(\ln \frac{B}{d} - 1 \right)}, \quad (5.33)$$

при неглубоком залегании водоупора (по В.М. Шестакову):

$$D_0 = \frac{8T}{B^2 + \left(1 + 8 \frac{L_{HD}}{B} \right)}, \quad (5.34)$$

где B – расстояние между дренами, м; d – диаметр дрен, м; L_{HD} – величина несовершенства дрен, м; T – толщина дренируемого слоя, м. Напорное подпитывание:

$$p_H = \frac{K_0}{h_0} (h_p - h_r), \quad (5.35)$$

где h_p – глубина залегания пьезометрической поверхности нижнего напорного горизонта; K_0, h_0 – коэффициент перетекания и толщина разделяющего слоя. Совместное решение (5.31) – (5.32) с учётом граничного условия по методу прогонки:

$$D = \frac{H_{N-1}^{j+1} - H_N^{j+1}}{R_{N-1}} = D_0(h_d - h_r) - \frac{K_0}{h_0} (h_p - h_r) - f_k, \quad (5.36)$$

$$H_N^{j+1} = \frac{Q_{N-1} - DR_{N-1}}{1 - P_{N-1}}. \quad (5.37)$$

Начальным условием служит исходная эпюра влажности, близкая к равновесной; под уровнем грунтовых вод принимается $\omega = m$. В результате решения на каждом шаге получают эпюры влажности и напоров, потоки влаги, устанавливают сроки и нормы поливов, оценивают влагообмен между корнеобитаемым и подстилающим слоями.

Для оценки реакции растений на изменение влажности почвы в программе «ПОЛИВ» используется модель накопления продуктивности, предложенная В.В. Шабановым:

$$\frac{U_{\phi}}{U_0} = K_{\omega} \cdot K_{\theta} \cdot K_{\Pi} \cdot K_S \cdot K_Z, \quad (5.38)$$

где U_0 – потенциальная урожайность культуры при всех оптимальных условиях и агротехнике; U_{ϕ} – фактическая урожайность при неблагоприятных условиях. В настоящей работе, как и в программе «Полив», учтено только влияние влажности K_{ω} , рассчитываемое как средневзвешенная по декадам вегетации величина с эмпирическим коэффициентом чувствительности растения к неоптимальности влагозапасов γ (для кукурузы принят равным 5,6).

При параметризации модели Голованова для условий расчётных участков региона Имбо использована версия программы «Полив» [12], настроенная на расчёт режима орошения для года характерной обеспеченности по дефициту влаги ($O_c - E_s$). Традиционно в проектах орошения используются параметры года 75%-ной обеспеченности [5, 17]; для климатических условий Республики Бурунди значения расчётной обеспеченности могут отличаться [14, 15], однако их уточнение не являлось предметом настоящего исследования.

5.2. Параметризация модели для трёх расчётных участков ландшафтной катены

Обоснование конкретных числовых параметров модели, представленное ниже для каждого из трёх расчётных участков, составляет самостоятельный этап настоящего исследования, выполненный на основе общей теоретической схемы модели.

Три расчётных участка расположены вдоль ландшафтной катены реки Русизи в провинции Бубанза (север региона Имбо): участок I (SCgl, солончаки глеевые) – на супераквальной фации поймы, ближе всего к руслу реки; участок II (GLmo, глейсоли молликовые) – на переходной трансаллювиальной фации; участок III (CMdy, камбисоли дистрические) – на первой надпойменной террасе, наиболее удалённой от реки (рисунок 5.1). Такое расположение соответствует

последовательному увеличению глубины залегания грунтовых вод от 0,8 м (участок I) до более 7 м (участок III), что определяет различия в водно-физических свойствах почв.

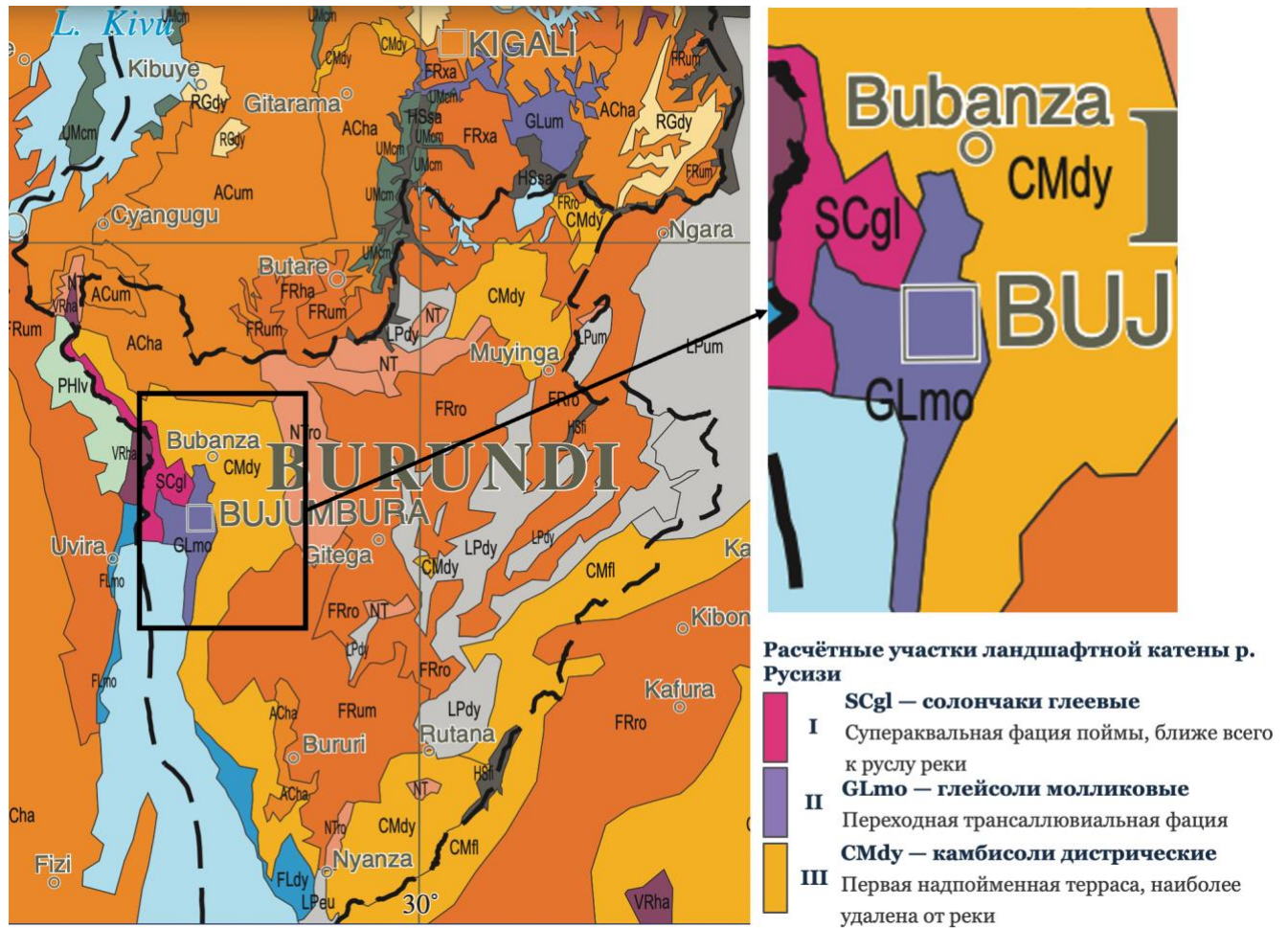


Рисунок 5.1 – Почвенная карта. Расположение расчётных участков.

Солончаки глеевые (SCgl) – засоленные почвы, формирующиеся в условиях высокой испаряемости при неглубоком залегании минерализованных грунтовых вод; глейсоли молликовые (GLmo) формируются в условиях периодического или постоянного переувлажнения, диагностируются по глеевому горизонту с признаками восстановления и окисления железа; камбисоли дистрические (CMdy) – умеренно развитые почвы со слабой дифференциацией профиля, кислой реакцией и умеренным естественным плодородием.

За расчётный период во всех вариантах принят период вегетации продолжительностью 120 суток; расчёт выполнен для ретроспективного 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги).

Таблица 5.1 – Климатические и агробиологические показатели

№ декады	Суммарное водопотребление, мм/сут (по Иванову)	Физическое испарение, доля от суммарного	Доля декады в накоплении биомассы
1	5,4	1	0
2	5,2	1	0,05
3	6,0	1	0,07
4	4,6	1	0,09
5	6,0	0,5	0,1
6	5,2	0,4	0,12
7	4,7	0,4	0,14
8	5,6	0,4	0,15
9	4,7	0,4	0,14
10	4,3	0,3	0,09
11	4,0	0,2	0,05
12	5,8	1	0

Таблица 5.1 приводит по декадам расчётного периода суммарное водопотребление кукурузы (рассчитанное по методу Иванова – в отличие от метода Пенмана–Монтейта, что отражает самостоятельный, независимый характер данной методики расчёта), долю физического испарения в его составе и долю каждой декады в накоплении биомассы растения; эти значения являются общими для всех трёх участков, поскольку определяются биологическими особенностями культуры и климатом, а не свойствами почвы. Фактический ряд суточных осадков расчётного 1999 года используется моделью для ежедневного пересчёта влагозапасов. Мощность увлажняемого горизонта принята: начальная – 0,3 м, средняя – 0,5 м, конечная – 0,5 м.

Ниже приведены гидрофизические параметры почвенных горизонтов и диапазоны регулирования влажности, установленные для каждого из трёх расчётных участков (таблица 5.2–5.4).

Участок I характеризуется наименьшей глубиной залегания грунтовых вод среди трёх участков (0,8 м), что при высоте капиллярного поднятия 1,1–1,4 м обеспечивает активное капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя (таблица 5.2). Плотность почвы возрастает вниз по профилю (1,2–1,4 г/см³), а коэффициент фильтрации горизонта С (0,55 м/сут) заметно выше, чем в горизонте В (0,20 м/сут), что способствует восходящему влагопереносу от неглубоких грунтовых вод.

Таблица 5.2 – Гидрофизические свойства почвенных горизонтов – участок I (ППВ 0,85 от пористости; влажность завядания $1,5 \cdot \omega_M$; начальная глубина ГВ 0,8 м; $\omega_{opt}=0,7$; $\omega_{min}=0,6$; $\omega_{max}=0,8$)

Горизонт	Мощность, м	Пористость, доли объёма	Максимальная молекулярная гигроскопичность	Максимальная влагоёмкость	Высота капиллярного поднятия, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	Плотность, г/см ³
A	0,5	0,48	0,06	0,22	1,1	0,40	1,2
B	1,5	0,43	0,07	0,18	1,4	0,20	1,4
C	2,0	0,40	0,08	0,17	1,2	0,55	1,3

Участок II занимает промежуточное положение по глубине грунтовых вод (2,5 м) (таблица 5.3). Коэффициент фильтрации здесь минимален среди трёх участков практически по всему профилю, что ограничивает как нисходящую фильтрацию, так и скорость восходящего капиллярного подтока – именно сочетание умеренной глубины залегания грунтовых вод и низкой фильтрационной способности почвы обуславливает слабое, но заметное капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя на этом участке.

Таблица 5.3 – Гидрофизические свойства почвенных горизонтов – участок II (ППВ 0,76 от пористости; начальная глубина ГВ 2,5 м; $\omega_{opt}=0,7$; $\omega_{min}=0,6$; $\omega_{max}=0,8$)

Горизонт	Мощность, м	Пористость, доли объёма	Максимальная молекулярная гигроскопичность	Максимальная влагоёмкость	Высота капиллярного поднятия, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	Плотность, г/см ³
A	0,5	0,48	0,06	0,22	1,1	0,40	1,2
B	0,5	0,43	0,07	0,18	1,4	0,50	1,4
C	3,0	0,40	0,08	0,17	1,6	0,10	1,3

На участке III грунтовые воды залегают наиболее глубоко среди трёх участков (более 7 м) (таблица 5.4), что практически исключает капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя. Совместно с наименьшей среди участков глубиной корнеобитаемого слоя это определяет наибольшую зависимость участка от искусственного орошения.

Таблица 5.4 – Гидрофизические свойства почвенных горизонтов – участок III (ППВ 0,85 от пористости; глубина ГВ более 7 м; $\omega_{opt}=0,7$; $\omega_{min}=0,6$; $\omega_{max}=0,8$)

Горизонт	Мощность, м	Пористость, доли объёма	Максимальная молекулярная гигроскопичность	Максимальная влагоёмкость	Высота капиллярного поднятия, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	Плотность, г/см ³
A	0,5	0,48	0,06	0,22	1,1	0,40	1,2
B	0,5	0,43	0,07	0,18	1,4	0,35	1,4
C	3,0	0,40	0,08	0,17	1,2	0,10	1,3

5.3. Результаты расчёта режима орошения кукурузы по трём участкам

Детальные графики расчёта (динамика влажности расчётного слоя почвы, водообмена на нижней границе, поливов, транспирации, осадков и испарения по декадам вегетационного периода 1999 года) для каждого из трёх участков представлены на рисунке 5.2–5.4.

Участок I (супераквальная фация). Расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги) показал, что оросительная норма составила 308 мм, средняя поливная норма – 38 мм, число поливов – 8, относительная продуктивность кукурузы – 98% от проектной. Величина водообмена на границе увлажняемого горизонта составила –7 мм (преобладание нисходящих вертикальных потоков). Грунтовые воды на протяжении всего вегетационного периода удерживаются на глубине 0,8–1,2 м, что свидетельствует об их участии в формировании водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя. Глубина и относительная стабильность грунтовых вод на пойменном участке при слабом промывном режиме (–7 мм) не создают выраженного риска вторичного засоления, несмотря на некоторую минерализацию грунтовых вод, при условии сохранения принятого деликатного режима орошения.

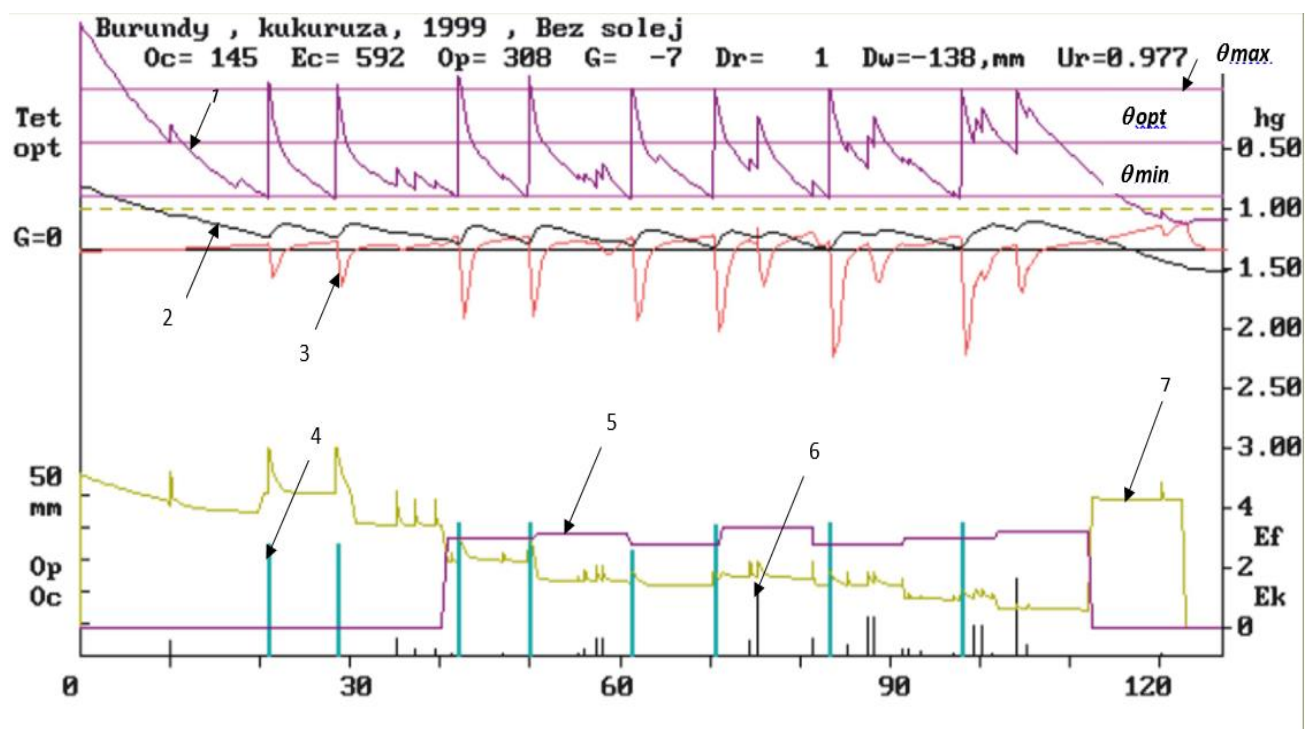


Рисунок 5.2 – Ретроспективный расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги), в условиях региона Имбо, Бурунди, супераквальная фация (пойменный участок I у реки Русизи).

Условные обозначения: 1 – влажность в расчётном слое почвы в течение вегетации, мм; 2 – уровень грунтовых вод, м; 3 – водообмен на нижней границе расчётного слоя почвы, мм; 4 – полив, мм; 5 – транспирация, мм; 6 – осадки, мм; 7 – испарение с поверхности почвы, мм.

Участок II (трансаллювиальная фация). Оросительная норма составила 341 мм, средняя поливная норма – 34 мм, число поливов – 10, относительная продуктивность кукурузы – 97% от проектной. Величина водообмена составила +4 мм, что указывает на слабое капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя при умеренном нисходящем промывном режиме (–23 мм). Грунтовые воды удерживаются на глубине около 2,5 м, обеспечивая слабое капиллярное подпитывание водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя.

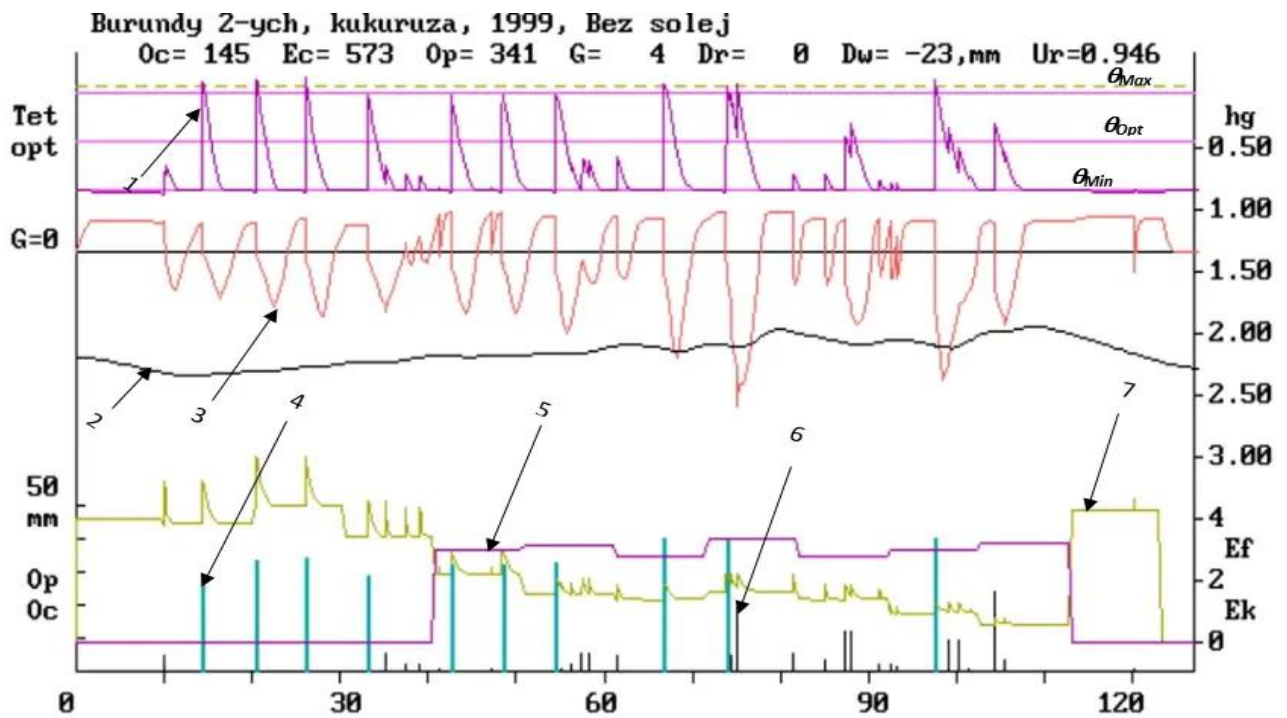


Рисунок 5.3 – Ретроспективный расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги), в условиях региона Имбо, Бурунди, трансаллювиальная фация (участок II).

Условные обозначения: 1 – влажность в расчётном слое почвы в течение вегетации, мм; 2 – уровень грунтовых вод, м; 3 – водообмен на нижней границе расчётного слоя почвы, мм; 4 – полив, мм; 5 – транспирация, мм; 6 – осадки, мм; 7 – испарение с поверхности почвы, мм.

Участок III (аллювиальная фация первой пойменной террасы). Оросительная норма составила 461 мм – наибольшая среди трёх участков, что отражает наибольший дефицит увлажнения на участке, наиболее удалённом от источников влаги. Средняя поливная норма – 33 мм, число поливов – 14, относительная продуктивность кукурузы – 98% от проектной. Величина водообмена составила –149 мм (нисходящий поток); высокие значения нисходящих потоков влаги и усиление промывного режима свидетельствуют о необходимости компенсации выноса биогенных веществ и проведения мероприятий по фертигации. Грунтовые воды удерживаются на глубине более 7 м – капиллярное подпитывание отсутствует, грунтовые воды не участвуют в формировании водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя.

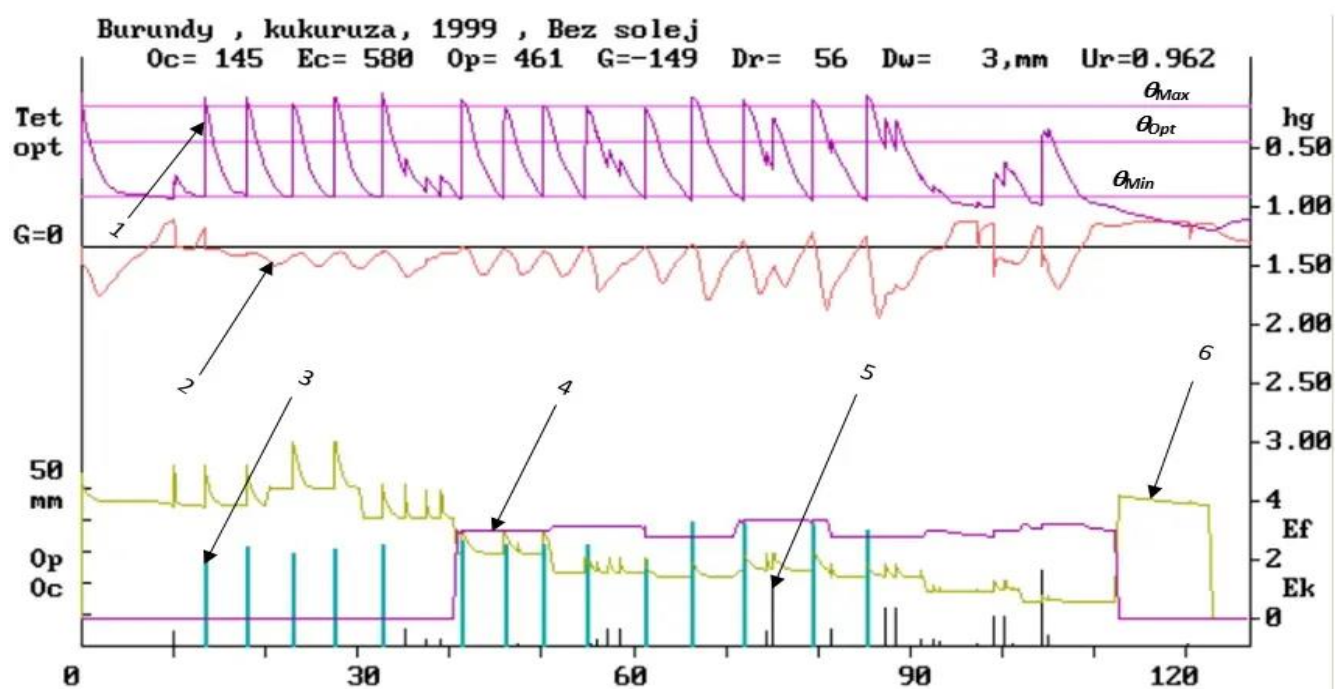


Рисунок 5.4 – Ретроспективный расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги), в условиях региона Имбо, Бурунди, аллювиальная фация в пределах первой пойменной террасы (участок III).

Условные обозначения: 1 – влажность в расчётном слое почвы в течение вегетации, мм; 2 – водообмен на нижней границе расчётного слоя почвы, мм; 3 – полив, мм; 4 – транспирация, мм; 5 – осадки, мм; 6 – испарение с поверхности почвы, мм (уровень грунтовых вод на графике не показан отдельной кривой ввиду их значительной и стабильной глубины на этом участке).

5.4. Водообмен по участкам катены по модели А.И. Голованова

Полученные результаты демонстрируют принципиальное отличие модели А.И. Голованова от расчётно-балансовых методов: непосредственный учёт водообмена между корнеобитаемым слоем и грунтовыми водами позволяет установить не только величину оросительной нормы, но и направление и интенсивность вертикальных потоков влаги на нижней границе расчётного слоя для каждого из трёх участков.

Направление и величина водообмена закономерно связаны с глубиной залегания грунтовых вод вдоль катены: на участке I (ГВ 0,8–1,2 м) водообмен минимален по модулю (–7 мм) при доминирующем участии грунтовых вод в

формировании водного режима корнеобитаемого слоя; на участке II (ГВ ~2,5 м) наблюдается слабое капиллярное подпитывание (+4 мм) на фоне умеренного нисходящего промывного режима (-23 мм); на участке III (ГВ более 7 м) капиллярное подпитывание отсутствует полностью, а нисходящий водообмен максимален (-149 мм), что определяет наибольшую оросительную норму среди трёх участков и необходимость мероприятий по фертигации для компенсации выноса биогенных элементов.

Относительная продуктивность кукурузы (97–98% от проектной) во всех трёх вариантах указывает на близкую к оптимальной обеспеченность растений влагой при рассчитанных режимах орошения, что подтверждает корректность параметризации модели применительно к почвенно-гидрологическим условиям каждого участка.

Выводы к главе 5

1. Расчёты режима орошения кукурузы по математической модели влагопереноса А.И. Голованова для условий региона Имбо Республики Бурунди выполнены впервые.
2. Использование математической модели А.И. Голованова, представляющей собой совокупность уравнения влагопереноса в неоднородных пористых средах и зависимостей, связывающих параметры водного режима почв, позволяет получить детальную качественную и количественную оценку комплексного мелиоративного воздействия и оценку продуктивности сельскохозяйственной культуры.
3. Участок I (солончаки глеевые): грунтовые воды (0,8–1,2 м) участвуют в формировании водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя. Слабый промывной режим (-7 мм) при минерализованных грунтовых водах обеспечивается режимом орошения с минимальной оросительной нормой (308 мм), что снижает риск вторичного засоления.

4. Участок II (глейсоли молликовые): грунтовые воды на глубине 2,5 м обеспечивают слабое капиллярное подпитывание (+4 мм) при умеренном нисходящем промывном режиме (−23 мм); оросительная норма составила 341 мм.
5. Участок III (камбисоли дистрические): грунтовые воды залегают глубоко (более 7 м), капиллярное подпитывание полностью отсутствует; нисходящий водообмен (−149 мм) указывает на интенсивный вынос биогенных элементов, что обуславливает необходимость фертигации; оросительная норма составила 461 мм – наибольшая среди трёх участков.
6. Полученные для трёх участков результаты (308, 341 и 461 мм) отражают закономерное увеличение оросительной нормы по мере роста глубины залегания грунтовых вод и уменьшения роли капиллярного подпитывания вдоль ландшафтной катены – от участка I к участку III.

ГЛАВА 6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ ПО МЕТОДИКЕ FAO CROPWAT 8.0 И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА А.И. ГОЛОВАНОВА

Методика FAO CROPWAT 8.0 не учитывает водообмен между корнеобитаемым слоем и подстилающими горизонтами и, соответственно, не позволяет учесть капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя при неглубоком залегании грунтовых вод. Это принципиальное ограничение балансового метода и составило прямую методическую предпосылку для расчёта режимов орошения тех же трёх участков ландшафтной катены по математической модели влагопереноса А.И. Голованова, учитывающей данный процесс явно. Настоящая глава сопоставляет результаты обоих методов и даёт физическое объяснение выявленным расхождениям.

6.1. Сводные результаты расчёта оросительных норм по двум независимым методам

Сравнению подлежат три независимых расчёта: методика FAO CROPWAT 8.0, математическая модель влагопереноса А.И. Голованова для характерного 1999 года (75%-й обеспеченности по дефициту влаги) и та же модель Голованова по данным многолетнего ряда наблюдений (1997–2016 гг.). Сводные результаты расчёта оросительных норм кукурузы по методике CROPWAT 8.0 и по модели Голованова (расчёт на 1999 год) для трёх участков ландшафтной катены региона Имбо представлены в таблице 6.1; результаты многолетнего расчёта по модели Голованова рассмотрены отдельно ниже.

Таблица 6.1 – наглядно показывает, что расхождение между методами не является постоянным по величине или знаку: на участках I и III оно небольшое и положительное (+1,3% и +2,9%), а на участке II – заметное и отрицательное (–11,4%). Число поливов при этом совпадает у обоих методов на участках I и III (8 и 14 соответственно) и различается на участке II (11 у CROPWAT против 10 у Голованова). Ниже даётся физическое и методическое объяснение этой закономерности.

Таблица 6.1 – Сопоставление оросительных норм по методам CROPWAT 8.0 и А.И. Голованова (расчёт на 1999 год)

Показатель	Участок I, CROPWAT	Участок I, Голованов	Участок II, CROPWAT	Участок II, Голованов	Участок III, CROPWAT	Участок III, Голованов
Норма нетто, мм	304	308	385	341	448	461
Норма брутто, мм	338	342	428	379	498	512
Число поливов	8	8	11	10	14	14
Расхождение с CROPWAT, %	-	+1,3	-	-11,4	-	+2,9

6.2. Физическое и методическое обоснование выявленных расхождений

Расхождение в величинах оросительных норм по катене составляет: +1,3% (участок I); -11,4% (участок II, Голованов даёт меньшую норму); +2,9% (участок III). Полученная закономерность не носит случайного характера и объясняется различием физических предпосылок, заложенных в основу двух методов: модель Голованова учитывает внутривегетационную динамику влагозапасов корнеобитаемого слоя, включая капиллярное подпитывание (участок II, ГВ 2,5 м) и нисходящий водообмен (участок III), тогда как CROPWAT не учитывает уровень грунтовых вод ни на одном из участков – это принципиальный концептуальный недостаток балансовой методики ФАО применительно к условиям катены реки Русизи, а не случайная погрешность расчёта.

Методика ФАО (CROPWAT 8.0) основана на алгебраическом решении простейшего балансового уравнения и не учитывает положение уровня грунтовых вод, водообмена и, как следствие, внутривегетационной динамики влажности почвы. Это может приводить к систематическому завышению расчётных оросительных норм на участках с неглубоким залеганием грунтовых вод, где капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя существенно снижает фактическую потребность в орошении.

Программа «ПОЛИВ» рассчитывает оросительную норму нетто независимо от способа подачи воды и не выдаёт брутто-значение. Для сопоставления с CROPWAT принят способ полива – дождевание, с коэффициентом полезного действия техники полива КПД = 90% (брутто = нетто / 0,90) – то же допущение,

что использовано в CROPWAT (304 → 338 мм соответствует КПД $\approx 90\%$). Дождевание для кукурузы при правильной настройке техники (давление, размер капли, минимизация сноса ветром) обеспечивает КПД 70–90% [24]; принятое значение 90% соответствует верхней границе диапазона и обосновано необходимостью методической сопоставимости норм, рассчитанных разными моделями.

6.3. Дифференциация расчетных оросительных норм при поливе кукурузы для трех фаций в пределах ландшафтной покатины реки Русизи

На рисунок 6.1 сопоставлены нетто-нормы орошения (без учёта КПД техники полива), рассчитанные по методике FAO CROPWAT 8.0 и по модели влагопереноса А.И. Голованова, для трёх участков ландшафтной покатины. По методу CROPWAT нормы монотонно возрастают по мере удаления от реки и углубления грунтовых вод: 304 мм (участок I), 385 мм (участок II), 448 мм (участок III). По модели Голованова, учитывающей капиллярное подпитывание из грунтовых вод, зависимость немонотонна: 308 мм (участок I) практически совпадает с CROPWAT, 341 мм (участок II) существенно ниже за счёт капиллярного подпитывания, 461 мм (участок III) немного выше при отсутствии подпитывания на больших глубинах ГВ.

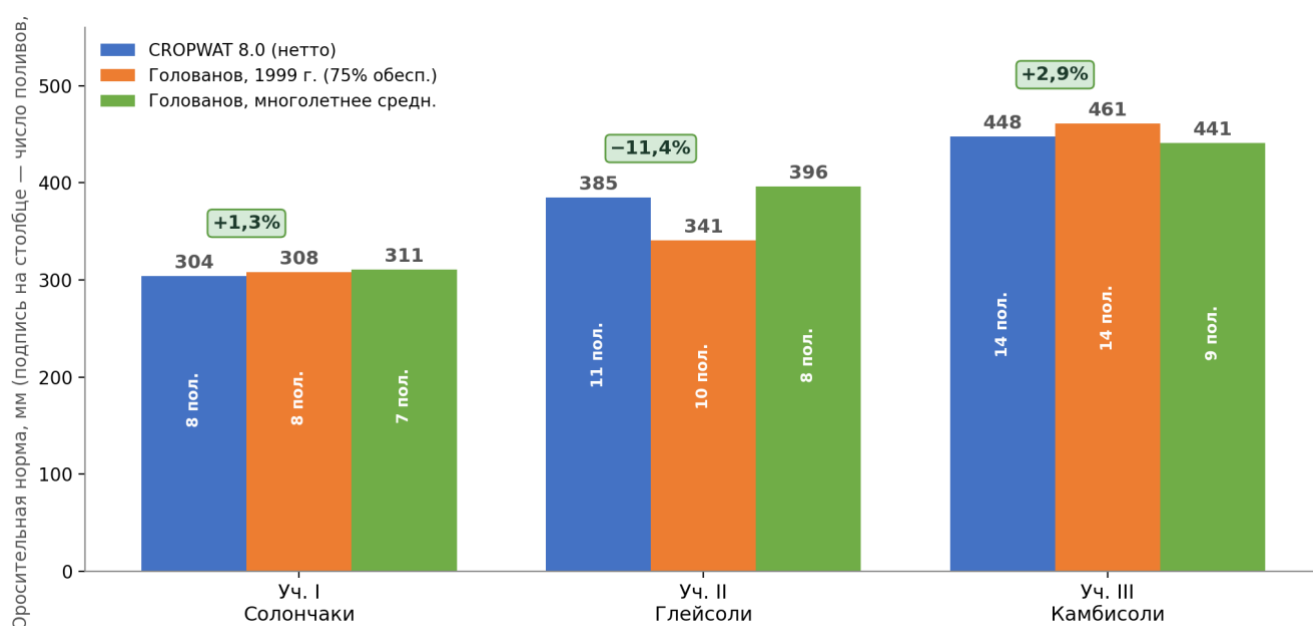


Рисунок 6.1 – Оросительные нормы (нетто) при поливе кукурузы по фациям ландшафтной покатины в условиях региона Имбо Республики Бурунди.

Наибольший визуальный разрыв между кривыми на рисунке 6.1 приходится на участок II, что графически иллюстрирует установленную закономерность: систематическое завышение расчётной оросительной нормы методом CROPWAT наблюдается избирательно – там, где капиллярный подток из грунтовых вод существенно снижает фактическую потребность культуры в поливе, и практически отсутствует там, где такой подток слабо выражен (участок I, при общем активном водообмене) либо полностью отсутствует (участок III).

На рисунок 6.2 те же результаты приведены в брутто-значениях (нетто-норма, делённая на КПД дождевальной техники, принятый равным 0,90 для обеих моделей – см. обоснование выше). Пересчёт в брутто-нормы сохраняет общий характер расхождения между методами по участкам катены, но увеличивает абсолютные значения норм пропорционально: 338, 428 и 498 мм по CROPWAT и 342, 379 и 512 мм по модели Голованова для участков I, II и III соответственно. Приведение к брутто-значениям необходимо для практического применения результатов при проектировании дождевальных оросительных систем.

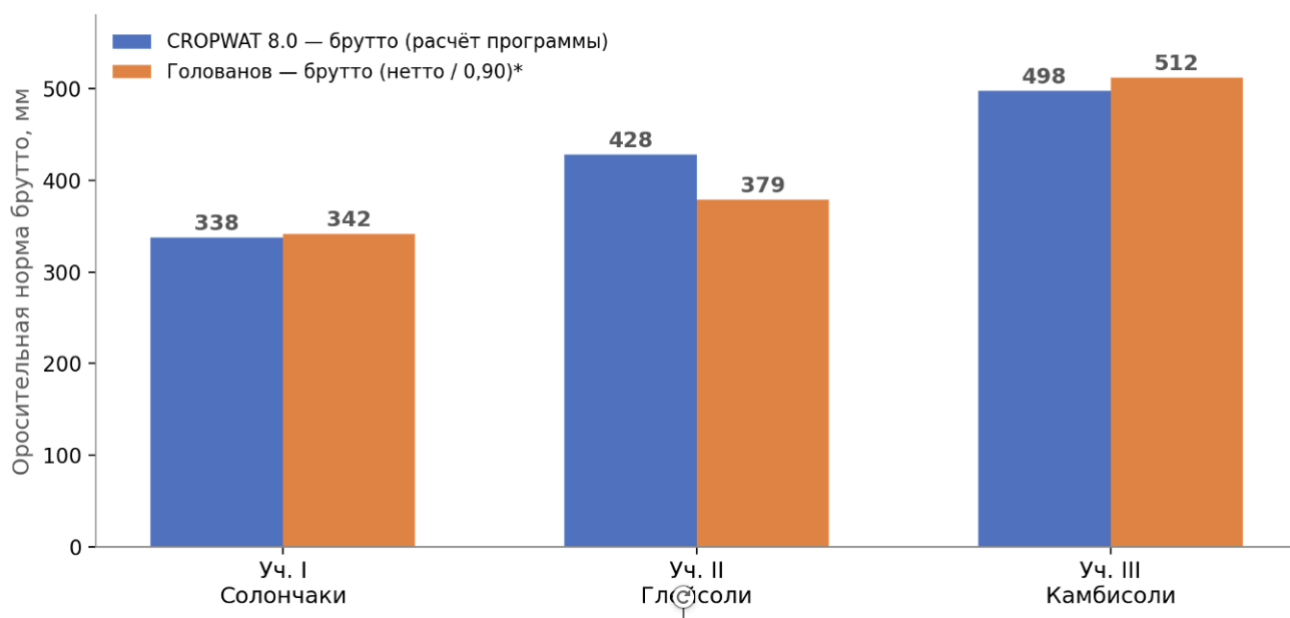


Рисунок 6.2 – Оросительный нормы (брутто): сопоставление CROPWAT и модели А.И. Голованова.

6.4. Расчёты оросительных норм и режима орошения кукурузы для года 75% обеспеченности в составе многолетних прогнозных расчетов (по данным многолетнего ряда наблюдений с 1997 по 2016 гг.)

Помимо расчёта на 1999 г. (75%-й обеспеченности по дефициту влаги), по модели А.И. Голованова выполнен расчёт водного баланса за весь ряд наблюдений 1997–2016 гг. (приложение 2); приводимые ниже значения – не новый расчёт, а результат применения той же модели Голованова, вводимый здесь для проверки устойчивости установленной в разделах 6.2–6.3 закономерности.

Результаты многолетнего расчёта составили: 311 мм при 7 поливах (участок I), 396 мм при 8 поливах (участок II), 441 мм при 9 поливах (участок III). В сравнении с расчётом на конкретный 1999 год (308, 341 и 461 мм соответственно) многолетние нормы на участках I и II оказались несколько выше, а на участке III – ниже. Различие объясняется тем, что при расчёте отдельного года начальные влагозапасы почвы задаются фиксированными, тогда как при многолетнем расчёте влагозапасы переходят от одного вегетационного периода к следующему, накапливая эффект дефицитных и избыточных по увлажнению лет за весь ряд наблюдений.

Таблица 6.2 – Сопоставление результатов расчёта по модели А.И. Голованова: характерный год и многолетний ряд

Участок	1999 г. (75% обеспеченности), мм	Многолетний ряд 1997– 2016 гг., мм	Разница, мм
I	308	311	+3
II	341	396	+55
III	461	441	–20

Таблица 6.2 показывает, что расхождение между расчётом на характерный год и многолетним рядом само по себе неоднородно по катене: минимально на участке I (+3 мм), максимально на участке II (+55 мм) и умеренно отрицательно на участке III (–20 мм). Тем не менее направление основной закономерности – немонотонность зависимости оросительной нормы от глубины залегания

грунтовых вод – сохраняется на обоих расчётных горизонтах: и по характерному году, и по многолетнему ряду норма на участке II оказывается ниже, чем можно было бы ожидать при монотонном росте вдоль катены, что и составляет физическую суть выявленного эффекта капиллярного подпитывания.

Многолетний расчёт даёт более устойчивую, статистически обоснованную оценку оросительной нормы и рекомендуется в качестве основы для проектных решений, тогда как расчёт на конкретный год 75%-й обеспеченности сохраняет значение для оценки условий острозасушливого года. Важно, что общая закономерность – немонотонность зависимости нормы от глубины залегания грунтовых вод, установленная по расчёту на 1999 год, – подтверждается и на многолетнем ряду, что повышает достоверность выявленной закономерности и снимает вопрос о её случайном характере.

6.5. Практическое значение установленных особенностей применения методов

Количественная оценка практических последствий выявленных расхождений между методами наиболее показательна для участка II, где расхождение максимально (–11,4%). Разница нетто-норм CROPWAT и модели Голованова на этом участке составляет $385 - 341 = 44$ мм, что в пересчёте на брутто-нормы (49 мм при КПД = 90%) эквивалентно 490 м³/га перерасхода оросительной воды при проектировании по методике CROPWAT без учёта капиллярного подпитывания из грунтовых вод. Для сравнения, на участке III, где грунтовые воды залегают глубоко и капиллярное подпитывание отсутствует, оба метода дают близкие результаты (расхождение брутто-норм всего 14 мм, или менее 3%) – то есть перерасход воды при использовании CROPWAT возникает избирательно, только там, где имеется существенное капиллярное питание, и отсутствует там, где грунтовые воды не влияют на водный режим корнеобитаемого слоя.

Полученный результат согласуется с более общим наблюдением: повышение формальной «эффективности» расчётного метода не всегда приводит к экономии воды на уровне системы в целом, если метод не учитывает ключевые физические

процессы конкретного участка [90] – в данном случае учёт капиллярного подпитывания моделью Голованова не столько «экономит» воду универсально, сколько корректирует завышенную оценку CROPWAT именно там, где этот процесс значим.

Помимо прямого перерасхода воды, завышенная оросительная норма влечёт за собой дополнительные издержки: увеличение энергозатрат на подъём и подачу воды, повышенный износ дождевальной техники, риск переувлажнения и вторичного заболачивания на участках с исходно неглубоким залеганием грунтовых вод (что особенно значимо для участка I, где уже отмечен риск вторичного засоления), а также потенциальные потери питательных веществ вследствие их вымывания из корнеобитаемого слоя при избыточном поливе.

Из изложенного следует практический вывод: при проектировании оросительных систем на участках ландшафтной катены с неглубоким и умеренным залеганием грунтовых вод (участки I и II) целесообразно использовать расчётные методы, учитывающие водообмен с грунтовыми водами (модель А.И. Голованова или её аналоги), тогда как на участках с глубоким залеганием грунтовых вод (участок III) применение более простой и доступной методики CROPWAT 8.0 является обоснованным и не приводит к значимой ошибке проектирования.

Установленная закономерность – систематическое и избирательное завышение расчётной оросительной нормы методом CROPWAT именно там, где капиллярное подпитывание из грунтовых вод существенно влияет на водный режим корнеобитаемого слоя, – не сводится к простой констатации количественного расхождения: это установленная и дважды подтверждённая (расчётом на характерный год и по многолетнему ряду) закономерность применимости каждого из двух методов в зависимости от почвенно-гидрогеологических условий конкретного участка ландшафтной катены.

Выводы к главе 6

Выполненные по методике FAO CROPWAT 8.0 и математической модели влагопереноса А.И. Голованова расчеты режима орошения кукурузы для трёх фаций в пределах ландшафтной катены реки Русизи региона Имбо позволяют сделать следующие выводы:

1. Расхождение результатов двух методов закономерно связано с глубиной залегания грунтовых вод и носит немонотонный характер по катене: +1,3% на участке I (супераквальная фация, ГВ 0,8 м), -11,4% на участке II (трансаллювиальная фация, ГВ 2,5 м) и +2,9% на участке III (аллювиальная фация, ГВ более 7 м).
2. Максимальное расхождение (-11,4%) на участке II объясняется тем, что модель Голованова учитывает капиллярное подпитывание корнеобитаемого слоя из неглубоко залегающих грунтовых вод, тогда как CROPWAT 8.0 такой механизм принципиально не учитывает – это основной концептуальный недостаток балансовой методики ФАО применительно к условиям катены реки Русизи, а не случайная погрешность расчёта.
3. На участках как с активным восходящим водообменом (участок I), так и с полным его отсутствием (участок III) оба метода дают близкие результаты (расхождение не превышает 3%), что подтверждает корректность обоих подходов в условиях, где капиллярное подпитывание либо выражено слабо на фоне общего водообмена, либо отсутствует вовсе; высокая согласованность методов, таким образом, установлена не только для участка с глубокими грунтовыми водами (III), но и для пойменного участка с наименьшей их глубиной (I).
4. Расчёт по многолетнему ряду наблюдений (1997–2016 гг.) в целом подтверждает результаты расчёта на характерный 1999 год (75%-й обеспеченности), с отклонениями, обусловленными эффектом переходящих влагозапасов между вегетационными периодами (от +3 мм на участке I до +55 мм на участке II); многолетний расчёт рекомендуется как более статистически обоснованная основа для проектных решений, а совпадение установленной

закономерности на обоих расчётных горизонтах повышает достоверность полученных результатов.

5. Количественно перерасход оросительной воды при использовании CROPWAT 8.0 без учёта уровня грунтовых вод на участке II оценивается в 490 м³/га (брутто); практическая рекомендация – применять расчётные методы с учётом водообмена (модель Голованова) на участках катены с неглубоким и умеренным залеганием грунтовых вод, а более простую методику CROPWAT 8.0 – на участках с глубоким залеганием грунтовых вод, где это не приводит к значимой ошибке проектирования.
6. Установленная закономерность избирательного расхождения методов в зависимости от глубины залегания грунтовых вод составляет научную новизну исследования в части оценки применимости методов расчёта режимов орошения и обеспечивает научно обоснованную основу для дифференцированного выбора расчётной методики при проектировании систем орошения кукурузы для почвенно-гидрогеологических условий, аналогичных региону Имбо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа содержит описание и результаты расчётов дифференцированных режимов орошения кукурузы для трёх участков ландшафтной катены реки Русизи агромелиоративного региона Имбо Республики Бурунди, выполненных двумя независимыми методами (FAO CROPWAT 8.0 и математической моделью влагопереноса А.И. Голованова) с использованием верифицированной климатической базы, сформированной на основе сопоставления данных реанализа AgERA5 и наблюдений метеостанций страны.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Дана комплексная оценка природно-климатических условий агромелиоративного региона Имбо по данным метеостанции Бужумбура и реанализа AgERA5 за период 1991–2020 гг. Регион характеризуется продолжительным сухим сезоном (июнь–октябрь), совпадающим с вегетационным периодом кукурузы, и трендом потепления $0,5\text{--}0,9^{\circ}\text{C}$ с выраженной территориальной неоднородностью: от $+0,3\text{--}0,4^{\circ}\text{C}$ у озера Танганьика, оказывающего терморегулирующее воздействие на прилегающие территории, до $+0,8\text{--}0,9^{\circ}\text{C}$ на центральном плато, лишённом крупных водных стабилизаторов климата. Эталонная эвапотранспирация достигает максимальных значений ($5,40\text{--}6,88$ мм/сут) именно в сухой сезон, что определяет наибольшую потребность кукурузы в орошении в этот период и обосновывает необходимость дифференцированного по агроклиматическим зонам подхода к планированию режимов орошения. Установлено также, что равнина Имбо, основной регион орошаемого земледелия страны, характеризуется повышенными по сравнению с другими зонами Бурунди темпами потепления, что усиливает практическую значимость выполненного исследования именно для этого региона.

2. Обоснована применимость данных реанализа AgERA5 для расчёта режимов орошения в Республике Бурунди и установлены поправочные коэффициенты. Сопоставление данных реанализа с наблюдениями шести метеостанций и детальная количественная проверка по метеостанции Бужумбура выявили систематические расхождения: занижение температуры воздуха на $0,5^{\circ}\text{C}$, относительной влажности – на 7%, суммарных осадков – на 17–20%. Показано, что занижение влажности приводит к завышению расчётной эвапотранспирации приблизительно на 8–10%, а занижение осадков – к пропорциональному завышению расчётной оросительной нормы, что делает эту погрешность наиболее значимой из всех выявленных для целей настоящего исследования. Применимость AgERA5 дифференцирована по территории (приоритет станционных наблюдений в регионах с плотной сетью метеостанций, использование реанализа для заполнения пропусков и пространственной интерполяции в удалённых регионах) и по сезонам года (данные реанализа приемлемы в сухой сезон, когда осадки минимальны, тогда как во влажный сезон при высокой изменчивости осадков приоритет сохраняется за станционными наблюдениями). Тем самым обоснован не универсальный, а дифференцированный характер применения реанализа AgERA5 как средства преодоления пространственной разреженности и временной неполноты станционной сети Бурунди, а не как безусловной замены метеорологических наблюдений.
3. Оценено влияние наблюдаемых тенденций изменения климата на режимы орошения кукурузы. Установлено, что тренд потепления, максимальный для региона Имбо ($0,75\text{--}0,9^{\circ}\text{C}$ за расчётный период), приводит к росту эталонной эвапотранспирации и, соответственно, к увеличению расчётных оросительных норм в перспективе на всех трёх участках ландшафтной катены независимо от типа почвы. Показано, что среди выявленных климатических расхождений между реанализом и наблюдениями наиболее существенное практическое значение для обоснования режимов орошения имеет именно систематическое занижение реанализом осадков (на 17–20%), поскольку эффективные осадки

напрямую вычитаются из потребности культуры в воде при определении оросительной нормы, и их занижение ведёт к прямому и пропорциональному завышению расчётной потребности в поливе. Полученные результаты позволяют учитывать климатический тренд не только как фон исследования, но и как самостоятельный фактор, требующий закладки запаса в проектных решениях по орошению на перспективу.

4. Рассчитаны дифференцированные режимы орошения кукурузы методом FAO CROPWAT 8.0 для трёх типов почв ландшафтной катены. Суммарное водопотребление ET_c за вегетационный период (01.07–28.10, 120 суток) составило 434,8 мм, эффективные осадки – 127,2 мм (29,2% от ET_c), теоретическая потребность в орошении по методу CWR – 312,0 мм; данные величины одинаковы для всех трёх участков, поскольку определяются климатическими данными и биологическими параметрами культуры и не зависят от типа почвы. Рассчитанные оросительные нормы, напротив, существенно дифференцированы по участкам за счёт различий диапазона доступной влаги (TAW): участок I (солончаки глеевые, TAW = 120 мм/м) – 304 мм нетто (337,8 мм брутто) при 8 поливах и эффективности графика орошения 97,9%; участок II (глейсоли молликовые, TAW = 120 мм/м) – 385 мм нетто (427,8 мм брутто) при 11 поливах и наивысшей среди участков эффективности 99,7%; участок III (камбисоли дистрические, TAW = 80 мм/м) – 448 мм нетто (497,8 мм брутто) при 14 поливах и наименьшей эффективности 85,6% вследствие наибольших потерь на инфильтрацию (64,6 мм). На всех трёх участках коэффициент водного стресса K_s составил 1,00, а фактическая эвапотранспирация ET_a – 100% потенциальной, что указывает на полное обеспечение потребности кукурузы в воде и позволило оценить расчётную урожайность зерна при орошении в 8–11 т/га. Одновременно выявлено принципиальное методическое ограничение методологии FAO CROPWAT 8.0: модель не учитывает водообмен между корнеобитаемым слоем и подстилающими горизонтами, что исключает возможность учёта капиллярного подпитывания при неглубоком залегании грунтовых вод (актуально прежде

всего для участка I) и обусловило необходимость применения второго, физически обоснованного метода расчёта.

5. Осуществлена параметризация математической модели влагопереноса А.И. Голованова и впервые для условий региона Имбо выполнен расчёт режимов орошения кукурузы с учётом динамики грунтовых вод. На участке I оросительная норма составила 308 мм при 8 поливах; грунтовые воды на глубине 0,8–1,2 м участвуют в формировании водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя, а слабый нисходящий водообмен (–7 мм) при минерализованных грунтовых водах снижает риск вторичного засоления при сохранении принятого деликатного режима орошения. На участке II норма составила 341 мм при 10 поливах; грунтовые воды на глубине 2,5 м обеспечивают слабое, но заметное капиллярное подпитывание (+4 мм) на фоне умеренного нисходящего промывного режима (–23 мм). На участке III норма составила 461 мм при 14 поливах – наибольшая среди участков, что отражает наибольший дефицит увлажнения на участке, наиболее удалённом от источников влаги; грунтовые воды залегают глубже 7 м, капиллярное подпитывание отсутствует полностью, а интенсивный нисходящий водообмен (–149 мм) указывает на необходимость мероприятий по фертигации для компенсации выноса биогенных элементов. Во всех трёх вариантах относительная продуктивность кукурузы составила 97–98% от проектной, что подтверждает корректность параметризации модели. Расчёт по многолетнему ряду наблюдений (1997–2016 гг.) в целом подтвердил результаты расчёта на характерный 1999 год (75%-й обеспеченности): 311 мм при 7 поливах на участке I, 396 мм при 8 поливах на участке II, 441 мм при 9 поливах на участке III; отличия объясняются эффектом переходящих между вегетационными периодами влагозапасов, а расчёт по многолетнему ряду признан более статистически обоснованной базой для проектных решений.
6. Проведено сравнение результатов расчёта режимов орошения кукурузы по методике FAO CROPWAT 8.0 и математической модели влагопереноса А.И. Голованова. Расхождение результатов двух методов закономерно связано с

глубиной залегания грунтовых вод и носит немонотонный характер по катене: +1,3% на участке I, -11,4% на участке II (максимальное расхождение среди трёх участков) и +2,9% на участке III. Установлено, что максимальное расхождение на участке II объясняется тем, что модель Голованова учитывает капиллярное подпитывание из неглубоко залегающих грунтовых вод, тогда как CROPWAT 8.0 такой механизм принципиально не учитывает – это составляет не случайную погрешность расчёта, а концептуальный недостаток балансовой методики ФАО применительно к условиям катены реки Русизи. На участках же с активным восходящим водообменом (I) и с его полным отсутствием (III) оба метода дают близкие результаты (расхождение не более 3%), что подтверждает корректность обоих подходов в соответствующих условиях. Установленная закономерность дважды независимо подтверждена – расчётом на характерный год и по многолетнему ряду наблюдений, – что повышает достоверность полученного результата. Количественно перерасход оросительной воды при использовании методики CROPWAT 8.0 без учёта уровня грунтовых вод на участке II оценивается в 490 м³/га (брутто). Научная новизна этого результата состоит в установлении самой закономерности избирательного расхождения расчётных методов в зависимости от глубины залегания грунтовых вод и роли капиллярного подпитывания – закономерности, впервые выявленной и дважды подтверждённой для почвенно-гидрогеологических условий ландшафтной катены региона Имбо, обеспечивающей научно обоснованную базу для дифференцированного выбора расчётной методики при проектировании систем орошения кукурузы в условиях, аналогичных региону Имбо.

Результаты, представленные в диссертации, свидетельствуют о том, что цель проведённого исследования достигнута: разработаны и научно обоснованы дифференцированные по типам почв режимы орошения кукурузы для условий агромелиоративного региона Имбо, установлена и дважды подтверждена закономерность применимости каждого из двух расчётных методов в зависимости от почвенно-гидрогеологических условий, а полученные результаты доведены до уровня конкретных практических рекомендаций.

Рекомендации по применению и развитию результатов диссертационного исследования включают:

1. Для участка I (солончаки глеевые, неглубокое залегание минерализованных грунтовых вод, 0,8–1,2 м) и территорий со сходными почвенно-гидрогеологическими условиями рекомендуется режим орошения с минимальной оросительной нормой (304 мм по CROPWAT 8.0, 308 мм по модели А.И. Голованова, 311 мм по многолетнему ряду 1997–2016 гг.), обеспечивающий слабый промывной режим и исключаящий подъём минерализованных грунтовых вод к поверхности. Оба расчётных метода дают здесь близкий результат (расхождение +1,3%), что позволяет использовать более простую методику CROPWAT 8.0 без существенной потери точности, однако регулярный контроль солевого режима и состояния грунтовых вод остаётся обязательным условием предотвращения вторичного засоления. Благодаря близости участка к метеостанции климатическую основу расчётов для него целесообразно формировать преимущественно по данным стационарных наблюдений, используя реанализ AgERA5 лишь для восполнения отдельных пропусков в рядах данных и с обязательным применением установленных поправочных коэффициентов (занижение температуры на 0,5°C, влажности – на 7%, осадков – на 17–20%).
2. Для участка II (глейсоли молликовые, умеренная глубина залегания грунтовых вод, около 2,5 м) и территорий со сходными условиями обязателен учёт капиллярного подпитывания корнеобитаемого слоя при проектировании: применение методики, не учитывающей этот процесс (CROPWAT 8.0, 385 мм), ведёт к перерасходу оросительной воды порядка 490 м³/га по сравнению с моделью А.И. Голованова (341 мм; расхождение –11,4%, наибольшее среди трёх участков), а также к дополнительным издержкам – увеличению энергозатрат на подачу воды, повышенному износу оросительной техники и риску переувлажнения почвы. Рекомендуется применять расчётные методы, учитывающие водообмен с грунтовыми водами (модель А.И. Голованова или её аналоги), а в качестве базовой величины для проектных решений

использовать норму по многолетнему ряду наблюдений (396 мм) как более статистически обоснованную по сравнению с расчётом на отдельный год (341 мм), сохраняя расчёт на конкретный год 75%-й обеспеченности для оценки условий острозасушливого года. При использовании данных реанализа AgERA5 для этого участка необходим дифференцированный по сезонам подход: в сухой сезон (июнь–октябрь) данные реанализа допустимо применять без дополнительной корректировки, тогда как во влажный сезон, характеризующийся высокой изменчивостью осадков, приоритет следует отдавать данным стационарных наблюдений.

3. Для участка III (камбисоли дистрические, глубокое залегание грунтовых вод, более 7 м) и территорий со сходными условиями применение более простой и доступной методики CROPWAT 8.0 обоснованно и не приводит к значимой ошибке проектирования (448 мм против 461 мм по модели Голованова, расхождение +2,9%), что позволяет дифференцированно подходить к выбору расчётного инструмента в зависимости от гидрогеологических условий конкретного участка, не прибегая к более трудоёмким физически обоснованным моделям там, где это не даёт существенного выигрыша в точности. В качестве базовой величины для проектных решений рекомендуется норма по многолетнему ряду наблюдений (441 мм). Интенсивный нисходящий водообмен (–149 мм) обуславливает необходимость мероприятий по фертигации для компенсации выноса биогенных элементов из корнеобитаемого слоя. Удалённость участка от метеостанции делает его основным потенциальным потребителем данных реанализа AgERA5 при проектировании – с обязательным применением установленных в настоящей работе поправочных коэффициентов, поскольку стационарные наблюдения для этой части катены менее доступны, чем для участков I и II.

Полученные дифференцированные по типам почв нормы и режимы орошения кукурузы, а также установленные поправочные коэффициенты реанализа AgERA5 рекомендуется использовать при проектировании и реконструкции ирригационных систем в агромелиоративном регионе Имбо, при

выборе расчётной методики в зависимости от глубины залегания грунтовых вод на конкретном участке, при разработке региональных программ развития орошаемого земледелия и методических указаний по обоснованию режимов орошения, а также при планировании водопользования на территориях Республики Бурунди, не обеспеченных достоверными стационарными наблюдениями.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАК — Высшая аттестационная комиссия

ВЗ — влажность завядания

ГВ — грунтовые воды

КПД — коэффициент полезного действия

НВ — наименьшая влагоёмкость

ОГХ — основная гидрофизическая характеристика

ПО — потребность в орошении

ППВ — предельная полевая влагоёмкость

РГАУ-МСХА — Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева

ФАР — фотосинтетически активная радиация

AgERA5 (Agrometeorological indicators from ERA5) — агрометеорологический реанализ Copernicus на основе ERA5

CLIMWAT — база данных климатических параметров ФАО, сопутствующая программе CROPWAT

CMdy (Cambisols Dystric) — камбисоли дистрические (тип почвы участка III)

CROPWAT — программный комплекс ФАО для расчёта водопотребления и режимов орошения

ET_0 (Reference Evapotranspiration) — эталонная эвапотранспирация

ET_a (Actual Evapotranspiration) — фактическая эвапотранспирация

ET_c (Crop Evapotranspiration) — эвапотранспирация (водопотребление) культуры

FAO (Food and Agriculture Organization) — Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН

GLmo (Gleysols Mollic) — глейсоли молликовые (тип почвы участка II)

ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi) — Институт сельскохозяйственных наук Бурунди

K_c (Crop Coefficient) — коэффициент культуры

K_s (Water Stress Coefficient) — коэффициент водного стресса

SCgl (Solonchaks Gleyic) — солончаки глеевые (тип почвы участка I)

TAW (Total Available Water) — диапазон доступной воды (продуктивные влагозапасы)

USDA (United States Department of Agriculture) — Министерство сельского хозяйства США

USDA S.C. Method (USDA Soil Conservation Service Method) — метод Службы охраны почв США (для расчёта эффективных осадков)

WRB (World Reference Base for Soil Resources) — Всемирная реферативная база почвенных ресурсов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аверьянов, С. Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. – Москва : Колос, 1978. – 288 с.
2. Айдаров, И. П. Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель. – Москва : Колос, 1980. – 304 с.
3. Брудастов, А. Д. Осушение минеральных и болотных земель. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Сельхозгиз, 1955. – 456 с.
4. Ведерников, В. В. Теория фильтрации и её применение в области ирригации и дренажа. – Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1939. – 248 с.
5. Голованов, А. И. Мелиорация земель : учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 816 с.
6. Голованов, А. И. Расчет впитывания влаги в почву при неглубоких уровнях грунтовых вод // Комплексное регулирование факторов жизни растений: труды Московского гидромелиоративного института. – М., 1981. – Т. 65. – С. 23–31.
7. Голованов, А. И. Расчёт режима орошения сельскохозяйственных культур учебно-методическое пособие. – Москва : РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2011. – 76 с.
8. Голованов, А. И. Теория и расчёт почвенно-гидрологических процессов // Труды ВНИИГиМ. – 1975. – Вып. 45. – С. 15–32.
9. Голованов, А. И. Мелиорация земель / А. И. Голованов, И. П. Айдаров, В. В. Шабанов [и др.]. – М. : КолосС, 2011. – 824 с.
10. Голованов, А. И. Мелиоративное земледелие / А. И. Голованов, А. Г. Балан, В. Е. Ермакова, И. Т. Ефимов. – М. : Агропромиздат, 1986. – 328 с.
11. Данильченко, Н. В. Методы определения суммарного водопотребления и расчет поливных режимов сельскохозяйственных культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 28 с.
12. Добрачёв, Ю. П. Управление орошением на основе моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур : дис. ... д-ра техн. наук. – Москва : ВНИИГиМ, 2003. – 320 с.

13. Дубенок, Н. Н. Ресурсосберегающие технологии орошения сельскохозяйственных культур. – Москва : Изд-во РГАУ-МСХА, 2012. – 228 с.
14. Исаева, С. Д. Оценка и регулирование эколого-мелиоративного состояния природно-технических систем. – Москва : ВНИИГиМ, 2004. – 260 с.
15. Ичитегетсе, И. Оценка потребности в орошении в бассейне реки Кабурантва в Республике Бурунди : выпускная квалификационная работа (магистерская). – Москва : РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2023.
16. Ичитегетсе, И. Текущее состояние и перспективы развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди / И. Ичитегетсе, С. А. Максимов // Природообустройство. – 2025. – № 5. – С. 39–46. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-39-46.
17. Карпенко, Н. П. Эколого-мелиоративная оценка и прогноз состояния мелиорируемых земель. – Москва : Изд-во МГУП, 2006. – 200 с.
18. Кащенко, Н. М. Расчёт влагопереноса в почве при расчёте параметров дренажа польдерных систем / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалёв // Природообустройство. – 2017.
19. Кизяев, Б. М. Комплексное обустройство и рациональное использование мелиорируемых земель. – Москва : ВНИИГиМ, 1987.
20. Кирейчева, Л. В. Мелиорация земель в России: перспективы развития. – Москва : ВНИИГиМ, 2017. – 296 с.
21. Ковда, В. А. Основы учения о почвах : в 2 книгах. – Москва : Наука,
22. Ковда, В. А. Проблемы борьбы с опустыниванием и засолением орошаемых почв. – Москва : Колос, 1984. – 304 с.
23. Ковда, В. А. Происхождение и режим засоленных почв : в 2 томах. – Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1946–1947.
24. Колесников, И. П. Техника для орошения / И. П. Колесников, Е. Е. Ищуров // Мелиорация и водное хозяйство : Обзорн. информ. / ЦНИИТЭИ Минводхоза СССР. – Москва, 1988. – Вып. 1. – С. 8–88.
25. Костяков, А. Н. Основы мелиорации. – М.: Сельхозгиз, 1960. – С. 7–157.

26. Краснощёков, В. Н. Эколого-экономическое обоснование комплексных мелиораций в системе адаптивно-ландшафтного земледелия. – Москва : Изд-во МГУП, 2002. – 291 с.
27. Кружилин, И. П. Орошаемое земледелие в засушливой зоне Нижнего Поволжья. – Волгоград, 1988.
28. Лихацевич, А. П. Математическое обоснование режимов орошения сельскохозяйственных культур. – Минск : БелНИИМиЛ, 1999.
29. Лобова, Е. В. Природа мира. Почвы / Е. В. Лобова, А. В. Хабаров. – Москва : Мысль, 1983. – 303 с.
30. Максименко, В. П. Ресурсосберегающие технологии орошения сельскохозяйственных культур. – Москва : ВНИИГиМ, 2011.
31. Максимов, С. А. Обоснование режима орошения сельскохозяйственных культур в засушливых условиях. – Москва, 2020.
32. Маслов, Б. С. Режим грунтовых вод переувлажнённых земель и его регулирование. – Москва : Колос, 1970. – 232 с.
33. Нийонзима, Н. Биоклиматическое обоснование необходимости орошения и осушения земель бассейна реки Русизи (Республика Бурунди) : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / науч. рук. В. В. Шабанов. – Москва : МГУП, 2013.
34. Никитенков, Б. Ф. Математические методы и модели в мелиорации. – Москва : Изд-во МГУП, 2000.
35. Никольский, Ю. Н. Влияние водного и солевого режимов почв на урожайность сельскохозяйственных культур. – Москва, 1988.
36. Орошение: Справочник // под. ред. Б.Б. Шумакова. М.: Агропромиздат, 1990. 415 с.
37. Побынов, Б. Б. Учение о ландшафтах // Избранные труды. – Москва : Изд-во АН СССР, 1956. – С. 493–511.
38. Рекс, Л. М. Системные исследования мелиоративных процессов и систем. – Москва : Аслан, 1995. – 192 с.
39. Решеткина, Н. М. Вертикальный дренаж / Н. М. Решеткина, Х. И. Якубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Колос, 1978. – 320 с.

40. Шабанов, В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 165 с.
41. Шабанов, В. В. Влагообеспеченность яровых зерновых культур и её расчёт. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. – 165 с.
42. Шабанов, В. В. Система задач по изучению условий внешней среды для комплексного мелиоративного регулирования // Комплексное регулирование факторов жизни растений: труды Московского гидромелиоративного института. – М., 1981. – Т. 65. – С. 3–22.
43. Шабанов, В. В. Возможное изменение климата и сельское хозяйство Республики Бурунди / В. В. Шабанов, Н. Нийонзима. – Деп. в ВИНТИ № 313-В2012 от 20.07.2012. – 64 с.
44. Шабанов, В. В. Оценка изменения факторов внешней среды в бассейне реки Русизи на территории Республики Бурунди / В. В. Шабанов, Н. Нийонзима // Природообустройство. – 2012. – № 3. – С. 30–35.
45. Шумаков, Б. А. Орошаемое земледелие. – Москва : Россельхозиздат, 1965. – С. 3–81.
46. Шумаков, Б. Б. Орошение в засушливой зоне Европейской части СССР. – Москва : Россельхозиздат, 1969. – 170 с.
47. Akoko, G. Evaluation of Irrigation Water Resources Availability and Climate Change Impacts – A Case Study of Mwea Irrigation Scheme, Kenya / G. Akoko, T. Kato, L. H. Tu // Water. – 2020. – Vol. 12, № 9. – Art. 2330. – DOI: 10.3390/w12092330.
48. Al-haddad, A. H. Scheduling of Leaching Requirements to Prevent the Secondary Salinisation in the Root Zone / A. H. Al-haddad, K. A. Hussien // Journal of Engineering. – 2023. – Vol. 20, № 08. – P. 35–51.
49. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements : FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome : FAO, 1998. – 300 p.

50. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method / R. G. Allen [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2006. – Vol. 81, № 1/2. – P. 1–22.
51. Deficit irrigation as a sustainable option for improving water productivity in Sub-Saharan Africa: the case of Ethiopia. A critical review / D. K. Asmamaw [et al.] // *Environmental Research Communications*. – 2021. – Vol. 3, № 10. – Art. 102001.
52. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture / S. Assouline, D. Russo, A. Silber, D. Or // *Water Resources Research*. – 2015. – Vol. 51, № 5. – P. 3419–3436.
53. Evaluating deficit irrigation scheduling strategies to improve yield and water productivity of maize in arid environment using simulation / A. Attia, S. El-Hendawy, N. Al-Suhaibani [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2021. – Vol. 249. – P. 106812.
54. Bably, A. Z. E. Sustainable Development and Management Policies for Soil and Water Conservation in Egypt / A. Z. E. Bably, S. A. A. El-Hafez // *Developments in Soil Classification, Land Use Planning and Policy Implications*. – Springer, 2013. – P. 633–647.
55. Community Management of Irrigation Infrastructure in Burkina Faso: A Diagnostic Study of Six Dam-Adjacent Irrigation Areas / C. B. Baki, A. Keïta, S. Palé [et al.] // *Agriculture*. – 2025. – Vol. 15, № 5. – P. 477.
56. Water and salt balances of two shallow groundwater cropping systems using subjective and objective irrigation scheduling / J. H. Barnard, L. D. Van Rensburg, A. T. P. Bennie, C. C. Du Preez // *Water SA*. – 2017. – Vol. 43, № 4. – P. 581.
57. Barrat, J.-M. Cartographie et validation des potentialités en eaux souterraines en domaine de socle sous climat tropical : exemple du Burundi / J.-M. Barrat, A. Gutierrez // *20es Journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie (AIH)*, La Chapelle-Hermier, juin 2015.
58. Bedasa, Y. Is Africa's food insecurity linked to land use coverage, irrigation adoption and water scarcity? // *Irrigation and Drainage*. – 2023. – Vol. 73, № 1. – P. 334–345.

59. The ERA5 global reanalysis: preliminary extension to 1950 / B. Bell [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2021. – Vol. 147, № 741. – P. 4186–4227.
60. Boniface, N. Mesoproterozoic high-grade metamorphism in pelitic rocks of the northwestern Ubendian Belt: Implication for the extension of the Kibaran intra-continental basins to Tanzania / N. Boniface, V. Schenk, P. Appel // Precambrian Research. – 2014. – Vol. 249. – P. 215–228.
61. Carte des sols et de la végétation du Burundi. – Bujumbura : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) ; Wageningen University and Research.
62. Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. – Wageningen University and Research.
63. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi : Édition 2022. – Bujumbura : Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, 2022.
64. Caverro, J. Simulation of Maize Yield under Water Stress with the EPICphase and CROPWAT Models / J. Caverro, I. Farré, P. Debaeke, J. M. Faci // Agronomy Journal. – 2000. – Vol. 92, № 4. – P. 679–690.
65. Celia, M. A. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation / M. A. Celia, E. T. Bouloutas, R. L. Zarba // Water Resources Research. – 1990. – Vol. 26, № 7. – P. 1483–1496.
66. Chandra, A. Water-energy-food linkages in community smallholder irrigation schemes: Center pivot irrigation in Rwanda / A. Chandra, D. M. Heeren, L. Odhiambo, N. Brozović // Agricultural Water Management. – 2023. – Vol. 289. – P. 108506.
67. CIMMYT. Stress Tolerant Maize for Africa: засуха, низкое плодородие и стрессоустойчивые сорта. URL: <https://www.cimmyt.org/projects/stress-tolerant-maize-for-africa-stma/>.
68. Cochet, H. Agrarian dynamics and population growth in Burundi: agroecology before its time // Dossiers de l'Environnement de l'INRA. – 2012.
69. Cochet, H. Agrarian dynamics, population growth and resource management: the case of Burundi // GeoJournal. – 2004. – Vol. 60, № 2. – P. 111–122.

70. Cochet, H. Agriculture paysanne et production alimentaire au Burundi // Les paysans, l'État et le Marché : Sociétés paysannes et Développement. – Paris : Publications de la Sorbonne, 1997.
71. Cochet, H. Burundi : quelques questions sur l'origine et la différenciation d'un système agraire // African Economic History. – 1998. – № 26. – P. 15–62.
72. Cochet, H. Diversité et modernité des paysages agraires du Burundi // Un géographe dans son siècle, actualité de Pierre Gourou. – Paris : Karthala, 2000.
73. Cochet, H. Dynamiques agraires et croissance démographique au Burundi
74. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2011. – Vol. 137, № 656. – P. 553–597.
75. Degens, E. T. Lake Tanganyika: water chemistry, sediments, geological structure / E. T. Degens, R. P. Von Herzen, H.-K. Wong // Naturwissenschaften. – 1971. – Vol. 58. – P. 229–241.
76. Díaz-Maroto, I. J. Chemical Properties and Macronutrients of Oak Soils in Northwest Spain / I. J. Díaz-Maroto, P. Vila-Lameiro // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2008. – Vol. 39, № 9–10. – P. 1416–1435.
77. Doorenbos, J. Yield Response to Water : FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33 / J. Doorenbos, A. H. Kassam. – Rome : FAO, 1979. – 193 p.
78. Doorenbos, J. Crop Water Requirements : FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24 / J. Doorenbos, W. O. Pruitt. – Rome : FAO, 1977. – 144 p.
79. Étude sur les coûts de l'inaction contre la dégradation des sols au Burundi : Rapport final. – Bujumbura : MEEATU ; FEM, 2015.
80. FAO Drought Portal: Burundi – описание уязвимости, структуры хозяйств и урожайности зерновых. URL: <https://www.fao.org/in-action/drought-portal/preparedness/vulnerability-and-impact-assessment/national-case-studies/burundi/en>.
81. Farm Africa. Maize Production Training Manual: посев, разметка, прополка, удобрения, ИПМ и почвозащитные меры. URL: <https://www.farmafrica.org/wp-content/uploads/2025/11/Farm-Africa-Maize-Production-Training-Manual.pdf>.

82. Feddes, R. A. Simulation of Field Water Use and Crop Yield / R. A. Feddes, P. J. Kowalik, H. Zaradny. – Wageningen : PUDOC, 1978. – 189 p.
83. Fontanet, M. Combined Simulation and Optimization Framework for Irrigation Scheduling in Agriculture Fields / M. Fontanet, D. Fernández-Garcia, G. Rodrigo, J. M. V. Mir // Hydrology and Earth System Sciences (preprint). – 2020.
84. Gabr, M. E. Assessment of irrigation management practices using FAO-CROPWAT 8, case studies: Tina Plain and East South El-Kantara, Sinai, Egypt / M. E. Gabr, E. M. Fattouh // Ain Shams Engineering Journal. – 2021. – Vol. 12, № 2. – P. 1623–1636.
85. Gabr, M. E.-S. Modelling net irrigation water requirements using FAO-CROPWAT 8.0 and CLIMWAT 2.0: a case study of Tina Plain and East South El-Kantara regions, North Sinai, Egypt // Archives of Agronomy and Soil Science. – 2021. – Vol. 68, № 10. – P. 1322–1337.
86. Estimating crop water requirement in Madhya Pradesh's agro-climatic regions: A CROPWAT and CLIMWAT software case study / V. Gaddikeri, J. Rajput, Dimple [et al.] // Environment Conservation Journal. – 2024. – Vol. 25, № 1. – P. 308–326.
87. Gahama, J. Le Burundi sous administration belge : la période du mandat 1919–1939. – Paris : Karthala Editions, 1983.
88. Gomes, L. D. Calibration of the CROPWAT Model for the Study of Soybean Production Systems / L. D. Gomes, D. L. Flumignan, É. Comunello, R. A. Garcia // Engenharia Agrícola. – 2023. – Vol. 43, № 1.
89. Gourdin, J. Étude chimique des eaux de la Rusizi et de ses affluents au Burundi / J. Gourdin, P. Hollebosh, C. Kibiriti. – Bujumbura : ISABU, 1986.
90. The paradox of irrigation efficiency / R. Q. Grafton [et al.] // Science. – 2018. – Vol. 361, № 6404. – P. 748–750.
91. Groundwater Vulnerability Map (COP) for the Nyanzari Catchment, Gitega, Burundi : Technical Report No. 7. – Hannover : IGEBU ; BGR, 2016. – DOI: 10.13140/RG.2.2.36199.80802.
92. Hagage, M. Monitoring soil salinization and waterlogging in the northeastern Nile Delta linked to shallow saline groundwater and irrigation water quality / M. Hagage,

- A. M. Abdulaziz, S. F. Elbeih, A. G. A. Hewaidy // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, № 1.
93. Hargreaves, G. H. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation / G. H. Hargreaves, R. G. Allen // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 2003. – Vol. 129, № 1. – P. 53–63.
 94. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present / S. Harrigan [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2020. – Vol. 12, № 3. – P. 2043–2060.
 95. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020. – Vol. 146, № 730. – P. 1999–2049. – DOI: 10.1002/qj.3803.
 96. Hornum, S. T. Enabling drip irrigation technology diffusion and adoption among African smallholders: A document analysis of climate action plans and donor projects / S. T. Hornum, S. Bolwig, S. L. M. Trærup // *Climate and Development*. – 2023. – Vol. 16, № 5. – P. 378–394.
 97. Investigation of Irrigation Water Requirement and Evapotranspiration for Water Resource Management in Southern Punjab, Pakistan / S. Hussain, M. Mubeen, W. Nasim [et al.] // *Sustainability*. – 2023.
 98. ИТА. Maize: основные ограничения производства кукурузы в Африке южнее Сахары. URL: <https://www.iita.org/cropsnew/maize/>.
 99. Irmak, S. Effect of full and limited irrigation amount and frequency on subsurface drip-irrigated maize evapotranspiration, yield, water use efficiency and yield response factors / S. Irmak, K. Djaman, D. R. Rudnick // *Irrigation Science*. – 2016. – Vol. 34, № 4. – P. 271–286.
 100. Jarvis, P. G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*. – 1976. – Vol. 273, № 927. – P. 593–610.
 101. The tradeoff between water savings and salinization prevention in dryland irrigation / S. Karimzadeh, S. Hartman, D. D. Chiarelli [et al.] // *Advances in Water Resources*. – 2024. – Vol. 183. – P. 104604.

102. Kawalko, D. Morphology and Physicochemical Properties of Alluvial Soils in Riparian Forests after River Regulation / D. Kawalko, P. Jezierski, C. Kabala // *Forests*. – 2021. – Vol. 12, № 3. – P. 329.
103. Impact of precipitation and increasing temperatures on drought trends in eastern Africa / S. Kew [et al.] // *Earth System Dynamics*. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 17–35. – DOI: 10.5194/esd-12-17-2021.
104. Formation of Solonchak in the Area of the Discharged Ancient Brine Wells (Perm Krai, Russia) / E. Khayrulina, N. Mitrakova, N. Poroshina [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10.
105. Kruger, J. A. AgERA5 representation of seasonal mean and extreme temperatures in the Northern Cape, South Africa / J. A. Kruger, S. J. Roffe, A. J. van der Walt // *South African Journal of Science*. – 2024. – Vol. 120, № 3/4. – Art. 16043. – DOI: 10.17159/sajs.2024/16043.
106. Radiation use efficiency and extinction coefficient for maize / J. L. Lindquist [et al.] // *AGRIS* *FAO*. URL: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65dfd5e84c5aef494fe5e392>.
107. Distributions of Heavy Metals and Benzo[a]pyrene in Oligotrophic Peat Soils and Peat Gleyzems of Northeastern Sakhalin / D. N. Lipatov, A. I. Shcheglov, D. V. Manakhov [et al.] // *Eurasian Soil Science*. – 2018. – Vol. 51, № 5. – P. 518–527.
108. Synergistic regulation of irrigation and drainage based on crop salt tolerance and leaching threshold / Y. Liu, Y. Hu, C. Wei [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2024. – Vol. 292. – P. 108679.
109. Manirakiza, P. Evaluation of Irrigation Systems Using Technical Performance Indicators and Farmers' Knowledge in Burundi / P. Manirakiza, W. Mbungu, A. Tarimo // *American Journal of Water Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 41–51. – DOI: 10.11648/j.ajwse.20220802.12.
110. Mathieu, C. *Le sol : origine, propriétés et fertilité*. – Paris,

111. Megerle, H. E. The Challenge of Food Security and the Water–Energy–Food Nexus: Burundi Case Study / H. E. Megerle, S. Niragira // *World Review of Nutrition and Dietetics*. – 2020. – Vol. 121. – P. 183–192.
112. Monteith, J. L. Evaporation and Environment // *Symposia of the Society for Experimental Biology*. – 1965. – Vol. 19. – P. 205–234.
113. Assessing the Capacity of the Water–Energy–Food Nexus in Enhancing Sustainable Agriculture and Food Security in Burundi / P. Mperejekumana, L. Shen, S. Zhong [et al.] // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, № 19. – Art. 14117. – DOI: 10.3390/su151914117.
114. NASA POWER Daily API: параметр ALLSKY_SFC_SW_DWN для суточной коротковолновой радиации. URL: <https://power.larc.nasa.gov/docs/services/api/temporal/daily/>.
115. Are active and former floodplain soils of the lower middle Elbe similar? A study of soil characteristics and possible implications for forest restoration / L. K. V. Navas, J. N. Becker, A. Heger [et al.] // *Catena*. – 2023. – Vol. 222. – P. 106814.
116. Ndayitegeye, O. Evaluation of CROPWAT 8.0 model in predicting the yield of East Africa Highland banana under different sets of irrigation scheduling / O. Ndayitegeye, J. O. Onyando, R. O. Okwany, J. K. Kwach // *Fundamental and Applied Agriculture*. – 2020. – Vol. 5, № 3. – P. 344–352. – DOI: 10.5455/faa.93386.
117. Ndayitwayeko, W. M. Determinants of technical efficiency in rice production in Gihanga (Burundi) Irrigation Scheme / W. M. Ndayitwayeko, M. Korir // *Egerton Journal of Science & Technology*. – 2012. – № 2. – P. 1–12.
118. Niyonkuru, R. Application of FAO-CROPWAT software for modelling irrigation schedule of rice in Rwanda / R. Niyonkuru, K. Sankaranarayanan, Suresh Kumar Pande, Deepak Das // *Rwanda Journal of Agricultural Sciences*. – 2019. – Vol. 1, № 1.
119. Optimizing Model Land Use and Crop Productivity in Agroforestry Farms for Food Security of Small Farmers in Burundi / A. Niyonzima, H. Megerle, H. Bernadette [et al.] // *Agricultural Sciences*. – 2025. – Vol. 16, № 1. – P. 123–145. – DOI: 10.4236/as.2025.161008.

120. Assessment of drought events, their trend and teleconnection factors over Burundi, East Africa / A. Nkunuzimana, S. Bi, M. A. A. Alriah [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. – 2021. – Vol. 145, № 3/4. – P. 1293–1316.
121. Spatiotemporal variation of rainfall and occurrence of extreme events over Burundi during 1960 to 2010 / A. Nkunuzimana, S. Bi, T. Jiang [et al.] // Arabian Journal of Geosciences. – 2019. – Vol. 12, № 5. – Art. 176.
122. Local Observations of Climate Change and Adaptation Responses: A Case Study in the Mountain Region of Burundi–Rwanda / A. Nkurunziza, D. Intwarinkase Mutaganzwa, W. M. Ndayitwayeko [et al.] // Land. – 2023. – Vol. 12, № 2. – Art. 329. – DOI: 10.3390/land12020329.
123. Nshimirimana, D. Agro-Food Processing Units and Their Contribution to Sustainable Development: Evidence from Butanyerera Province, Burundi / D. Nshimirimana, S. Nimubona, A. Diniragora, B. Minani // Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry. – 2026. – Vol. 12, № 1. – P. 233–247. – DOI: 10.9734/ajraf/2026/v12i1482.
124. Nyamba, B. The role of irrigation in boosting agricultural productivity in rural Burkina Faso / B. Nyamba, P. R. Zidouemba // SN Business & Economics. – 2025. – Vol. 5, № 8.
125. Osafo, N. O.-A. Contrasting catchment soil pH and Fe concentrations influence DOM distribution and nutrient dynamics in freshwater systems / N. O.-A. Osafo, J. Jan, P. Porcal, J. Borovec // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 858. – P. 159988.
126. The Global Trend of the Net Irrigation Water Requirement of Maize from 1960 to 2050 / A. Oumarou Abdoulaye, H. Lu, Y. Zhu [et al.] // Climate. – 2019. – Vol. 7, № 10. – Art.
127. Pasiani, R. Estimation of Crop Water Requirements and Irrigation Demand for Maize and Rice in Morogoro, Tanzania Using the CROPWAT 8.0 Model / R. Pasiani, J. Mangesho, P. T. S. Limbu // Tanzania Journal of Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 44, № 4. – Art. 4.

128. Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1948. – Vol. 193, № 1032. – P. 120–145.
129. 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, № 2. – P. 81–92.
130. Raes, D. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description / D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres // Agronomy Journal. – 2009. – Vol. 101, № 3. – P. 438–447.
131. Raheb, A. R. Comparison of Clay Mineralogy and Micromorphological Image Analysis of Anaerobic and Aerobic Soils in the North of Iran / A. R. Raheb, A. Heidari // Eurasian Soil Science. – 2023.
132. Rezapour, S. Assessment of the Quality of Salt-Affected Soils After Irrigation and Cultivation in Semi-arid Condition / S. Rezapour, E. Kalashypour, F. Asadzadeh // International Journal of Environmental Research. – 2017. – Vol. 11, № 3. – P. 301–313.
133. Recent intensification of the seasonal rainfall cycle in equatorial Africa revealed by farmer perceptions, satellite-based estimates, and ground-based station measurements / J. Salerno [et al.] // Climatic Change. – 2019. – Vol. 153, № 1/2. – P. 123–139.
134. Scenarios of maize yields under different technology levels in Sub-Saharan Africa // Nature Communications. – 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-48859-0>.
135. ScienceDirect / Field Crops Research. Обзор влияния густоты и междурядий на конкурентоспособность кукурузы против сорняков. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219416301193>.
136. Şen, B. Determining the Changing Irrigation Demands of Maize Production in the Cukurova Plain under Climate Change Scenarios with the CROPWAT Model // Water. – 2023. – Vol. 15, № 24. – Art. 4215. – DOI: 10.3390/w15244215.

137. Smith, M. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management : FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. – Rome : FAO, 1992.
138. Investigation of Irrigation Water Requirements for Major Crops Using CROPWAT Model Based on Climate Data / G. S. Solangi, S. A. Shah, R. S. Alharbi [et al.] // Water. – 2022. – Vol. 14, № 16. – Art. 2578. – DOI: 10.3390/w14162578.
139. Assessing AgERA5 and MERRA-2 Global Climate Datasets for Small-Scale Agricultural Applications / K. X. Soulis, E. Dosiadis, E. Nikitakis [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16, № 3. – Art. 263. – DOI: 10.3390/atmos16030263.
140. Souza, D. S. L. de, Silva M. L. da, Batezelli A., Mira Í. R. C. de, Silva G. T. G. Gleysols genesis and fluvial dynamics in a quaternary floodplain of the meandering river, Minas Gerais, Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 2023. – Vol. 131. – P. 104615.
141. Steduto, P. Crop Yield Response to Water : FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66 / P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, D. Raes. – Rome : FAO,
142. Stratégie nationale et plan d'action de lutte contre la dégradation des sols au Burundi. – Bujumbura : Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme (MEEATU), 2011.
143. FAO CROPWAT Model-Based Irrigation Requirements for Coconut to Improve Crop and Water Productivity in Kerala, India / U. Surendran, C. M. Sushanth, E. J. Joseph [et al.] // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, № 18. – Art. 5132.
144. Evaluating reanalysis datasets as meteorological input for estimating reference evapotranspiration in Africa and Southwest Asia / B. N. Tran, S. Dehati, S. Seyoum [et al.] // Hydrological Sciences Journal. – 2026. – Vol. 71, № 4. – P. 654–672. – DOI: 10.1080/02626667.2025.2600682.
145. Soils of Lacustrine Depressions of Pulsing Chloride Lakes in Endorheic Areas of Central Asia / V. I. Ubugunova, L. L. Ubugunov, A. D. Zhambalova [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, № 12. – P. 1897–1910.
146. Soils of Lakeside Depressions of Pulsing Chloride Lakes of Internal Runoff in Central Asia: Morphology, Physical-Chemical and Geochemical Features / V. I.

- Ubugunova, L. L. Ubugunov, A. D. Zhambalova [et al.] // Почвоведение. – 2023. – № 12. – P. 1580–1595.
147. Wang, K. Drainage-Process Analyses for Agricultural Non-Point-Source Pollution from Irrigated Paddy Systems / K. Wang, R. Zhang, H. Chen // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2014. – Vol. 140, № 1.
148. Welde, K. Effect of different furrow and plant spacing on yield and water use efficiency of maize / K. Welde, H. L. Gebremariam // Agricultural Water Management. – 2016. – Vol. 177. – P. 215–220.
149. World Bank / FAO. Cereal yield, Burundi, ряд 1961–2024. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/AG.YLD.CREL.KG?locations=BI>.
150. World Bank. Burundi country overview: роль сельского хозяйства и структура занятости. URL: <https://www.worldbank.org/ext/en/country/burundi>.
151. Effect of water application methods on salinity leaching efficiency in different textured soils based on laboratory measurements and model simulations / T. Yang, S. Cherchian, X. Liu [et al.] // Agricultural Water Management. – 2023. – Vol. 281. – P. 108250.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Годовые суммы осадков, испаряемости и дефицита влажности за период 1997–2016 гг. и обеспеченность метеорологических условий

Таблица А.1 – Годовые суммы осадков, испаряемости и дефицита влажности за период 1997–2016 гг., мм

Год	Осадки, мм	Испарение, мм	Дефицит, мм
1997	090	612	522
1998	069	566	497
1999	132	555	423
2000	038	644	607
2001	119	496	377
2002	066	606	540
2003	099	620	521
2004	107	587	480
2005	042	603	561
2006	118	601	483
2007	183	531	349
2008	094	557	463
2009	070	609	538
2010	089	584	495
2011	159	495	336
2012	212	498	287
2013	094	523	429
2014	124	545	420
2015	104	587	484
2016	025	645	620
Среднее	102	573	472

Примечание – среднегодовое весеннее увлажнение расчетного слоя почвы составляет 50 мм.

Таблица А.2 – Обеспеченность метеорологических условий по годовым суммам осадков

Год	Обеспеченность, %	Осадки, мм	Испарение, мм	Дефицит, мм
2000	10	038	644	607
2009	25	070	609	538
2015	50	104	587	484
1999	75	132	555	423
2007	90	183	531	349

Примечание – расчетным принят год 1999 (обеспеченность 75 %).

Приложение Б. Ретроспективный расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности по дефициту влаги)

Условные обозначения. КапП – капиллярное питание расчётного слоя; ГГВ – глубина залегания грунтовых вод; ОтГВ – отток влаги к грунтовым водам; Δ Запас – изменение влагозапаса; Баланс – невязка водного баланса. Столбцы +Sol, -Sol, Ds, Bs, Nk характеризуют солевой режим (приход, расход, дефицит и баланс солей, степень засоления) в том виде, в каком они приведены в исходной ведомости программы «Полив»; расчёт выполнен в режиме «без учёта засоления» (Bez solej).

Приложение Б.1. Участок I – супераквальная фация

Таблица Б.1.1 – Результаты посуточного расчёта водного и солевого баланса за расчётный 1999 год

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Δ Запас, мм	Баланс, мм	+Sol	-Sol	Ds	Bs, гр	Nk, ‰
21	5	90	0	4	123	1	-86	-0	0	0	0	0	0
21	0	0	35	0	124	0	35	0	14	0	0	14	0
28	0	35	0	1	124	0	-35	-0	0	0	0	0	0
28	0	0	35	0	124	0	34	0	14	0	0	14	0
42	11	53	0	3	128	0	-42	-0	0	0	0	0	0
42	0	0	42	0	128	0	41	0	17	0	0	17	0
50	1	42	0	-0	128	0	-41	-0	0	0	0	0	0
50	0	0	41	0	128	0	41	0	17	0	0	17	0
61	14	58	0	-0	130	0	-44	-0	0	0	0	0	0
61	5	0	33	0	130	0	37	0	13	0	0	13	0
70	0	42	0	-1	132	0	-42	-0	0	0	0	0	0

70	0	0	41	0	132	0	41	0	16	0	0	16	0
83	29	71	0	-6	133	0	-42	0	0	0	0	0	0
83	0	0	41	0	133	0	41	0	16	0	0	16	0
98	33	73	0	-12	133	0	-40	-0	0	0	0	0	0
98	0	0	41	0	133	0	41	0	16	0	0	16	0
127	47	125	0	4	152	0	-77	-1	0	0	0	0	0

Таблица Б.1.2 – Итоговые показатели водного и солевого баланса за расчётный сезон

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	ΔЗапас, мм	Баланс, мм	+Sol	- Sol	Ds	Bs, гр	Nk, ‰
127	145	592	308	-7	120	1	-138	-1	123	0	0	123	0

Приложение Б.2. Участок II – трансаллювиальная фация

Таблица Б.2.1 – Результаты посуточного расчёта водного и солевого баланса за расчётный 1999 год

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	ΔЗапас, мм	Баланс, мм	+Sol	-Sol	Ds	Bs, гр	Nk, ‰
14	5	57	0	35	233	0	-27	-25	0	0	0	0	0
14	0	0	29	0	233	0	28	0	11	0	0	11	0
20	0	24	0	-4	230	0	-24	-0	0	0	0	0	0
20	0	0	34	0	230	0	33	0	13	0	0	13	0
26	0	26	0	-6	227	0	-26	-0	0	0	0	0	0
26	0	0	34	-0	227	0	34	0	14	0	0	14	0
33	0	30	0	-4	222	0	-30	-0	0	0	0	0	0
33	0	0	28	-0	223	0	28	0	11	0	0	11	0
43	11	37	0	-7	218	0	-20	-6	0	0	0	0	0
43	0	0	32	-0	218	0	32	0	13	0	0	13	0
48	1	31	0	-2	217	0	-29	-0	0	0	0	0	0
48	0	0	32	-0	217	0	32	0	13	0	0	13	0
54	0	30	0	-2	216	0	-30	-0	0	0	0	0	0
55	0	0	33	-0	216	0	32	0	13	0	0	13	0
67	19	59	0	-7	212	0	-28	-12	0	0	0	0	0
67	0	0	40	-0	212	0	40	0	16	0	0	16	0
74	0	34	0	-8	209	0	-33	-0	0	0	0	0	0
74	0	0	39	-0	209	0	39	0	16	0	0	16	0

97	61	120	0	-6	210	0	-41	-18	0	0	0	0	0
98	1	0	40	-0	210	0	41	0	16	0	0	16	0
127	47	123	0	16	228	0	-74	-1	0	0	0	0	0

Таблица Б.2.2 – Итоговые показатели водного и солевого баланса за расчётный сезон

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	ΔЗапас, мм	Баланс, мм	+Sol	-Sol	Ds	Bs, гр	Nk, %
127	145	573	341	4	215	0	-23	-64	136	0	0	136	0

Приложение Б.3. Участок III – аллювиальная фация в пределах первой пойменной террасы

Таблица Б.3.1 – Результаты посуточного расчёта водного и солевого баланса за расчётный 1999 год

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	ΔЗапас, мм	Баланс, мм	+Sol	-Sol	Ds	Bs, гр	Nk, ‰
13	5	54	0	-15	8800	2	-43	-8	0	0	0	0	0
13	0	0	28	0	8800	0	27	0	11	0	0	11	0
18	0	19	0	-3	8800	1	-19	-1	0	0	0	0	0
18	0	0	31	-0	8800	0	31	0	12	0	0	12	0
23	0	22	0	-8	8800	1	-23	-0	0	0	0	0	0
23	0	0	29	-0	8800	0	29	0	12	0	0	12	0
28	0	21	0	-7	8800	1	-22	-0	0	0	0	0	0
28	0	0	31	-0	8800	0	31	-0	12	0	0	12	0
33	0	22	0	-9	8800	1	-22	-0	0	0	0	0	0
33	0	0	32	-0	8800	0	32	0	13	0	0	13	0
41	10	33	0	-15	8800	2	-17	-7	0	0	0	0	0
41	1	0	34	-0	8800	0	34	0	13	0	0	13	0
46	0	24	0	-9	8800	1	-25	-0	0	0	0	0	0
46	0	0	32	-0	8800	0	32	0	13	0	0	13	0
50	1	23	0	-8	8800	1	-23	-0	0	0	0	0	0
50	0	0	32	-0	8800	0	32	0	13	0	0	13	0
55	0	23	0	-9	8800	1	-24	-0	0	0	0	0	0
55	0	0	32	-0	8800	0	32	0	13	0	0	13	0

61	14	33	0	-16	8800	1	-20	-0	0	0	0	0	0
61	5	0	27	0	8800	0	32	0	11	0	0	11	0
66	0	23	0	-11	8800	1	-24	-0	0	0	0	0	0
66	0	0	40	0	8800	0	39	0	16	0	0	16	0
72	0	26	0	-15	8800	1	-27	-0	0	0	0	0	0
72	0	0	39	0	8800	0	39	0	16	0	0	16	0
79	24	43	0	-22	8800	2	-20	-0	0	0	0	0	0
79	0	0	39	0	8800	0	39	0	16	0	0	16	0
85	6	31	0	-17	8800	1	-26	-0	0	0	0	0	0
85	4	0	37	0	8800	0	40	-0	15	0	0	15	0
127	77	181	0	15	8800	40	-129	-16	0	0	0	0	0

Таблица Б.3.2 – Итоговые показатели водного и солевого баланса за расчётный сезон

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	ΔЗапас, мм	Баланс, мм	+Sol	-Sol	Ds	Bs, гр	Nk, ‰
127	145	580	461	-149	8800	56	3	-33	184	0	0	184	0

Приложение В. Многолетний анализ элементов водного баланса по Голованову (1997–2016 гг.)

Условные обозначения. КапП – капиллярное питание расчётного слоя; ГГВ – глубина залегания грунтовых вод; ОтГВ – отток влаги к грунтовым водам; $\theta_{Нw}$, θ_{He} – влажность почвы в слоях Нw и He соответственно, д. ед.; $V_{запНw}$, $V_{запHe}$ – влагозапасы в слоях Нw и He соответственно, д. ед.

Для итоговых показателей за расчётный год: ГГВ_{вег} – глубина залегания грунтовых вод в период вегетации; Весув – весеннее увлажнение; Урожай – расчётный коэффициент относительной урожайности.

Приложение В.1. Участок I (Solonchaks Gleyic)

Таблица В.1.1 – Посуточная динамика элементов водного баланса за расчётный 1999 год

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	$\theta_{Нw}$	θ_{He}	$V_{запНw}$	$V_{запHe}$
002	000	010	000	-010	097	000	-010	000	0.480	0.504	0.304	0.406
011	005	048	000	-003	110	001	-044	000				
012	000	001	053	000	110	000	052	000				
012	000	001	000	-002	108	000	-001	000	0.659	0.656	0.337	0.455
022	000	045	000	-004	106	001	-045	000				
022	000	000	015	000	106	000	015	000	0.502	0.510	0.366	0.499
022	000	001	052	000	107	000	052	000				
032	000	051	000	-001	107	001	-052	000	0.413	0.457	0.390	0.535
042	009	088	000	010	120	001	-080	000	0.375	0.421	0.415	0.572
048	010	117	000	020	130	001	-108	000				

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θНw	θНе	VзапНw	VзапНе
048	000	001	049	000	130	000	049	000				
051	000	017	000	-009	122	000	-017	000	0.404	0.444	0.433	0.599
061	014	059	000	002	132	000	-045	000	0.348	0.401	0.450	0.625
062	018	064	000	003	133	000	-046	000				
062	000	001	053	000	134	000	052	000				
068	000	021	000	-015	119	000	-021	000				
068	000	000	052	000	119	000	051	000				
071	000	013	000	-012	102	000	-013	000	0.484	0.537	0.465	0.648
081	021	062	000	-005	114	001	-042	000	0.414	0.483	0.478	0.667
091	051	104	000	003	122	001	-053	000	0.416	0.474	0.487	0.681
101	065	141	000	012	131	001	-077	000	0.373	0.428	0.494	0.691
107	099	165	000	010	129	001	-067	000				
107	000	000	052	000	129	000	052	000				
111	000	012	000	-017	109	000	-012	000	0.461	0.525	0.499	0.698
121	000	057	000	-003	126	000	-057	000	0.354	0.421	0.500	0.700
133	001	077	000	007	136	000	-076	000	0.349	0.395	0.500	0.700
145	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.396	0.500	0.700
157	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
169	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
181	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θНw	θНе	VзапНw	VзапНе
193	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
205	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
217	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
229	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
241	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
253	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
265	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
278	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
290	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
302	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
314	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
326	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
338	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
350	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
362	001	077	000	008	136	000	-076	000	0.351	0.397	0.500	0.700
366	001	077	000	008	136	000	-076	000				

Таблица В.1.2 – Итоговые показатели водного баланса за расчетный год

Сутки	Осадки, мм	Испар., мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	ГГВвег, см	Весув, мм	Урожай
366	132	540	311	019	129	003	-100	000	115	50	0.980

Приложение В.2. Участок II (Gleysols Mollic)

Таблица В.2.1 – Посуточная динамика элементов водного баланса за расчетный 1999 год

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θ_{Hw}	θ_{He}	$V_{запHw}$	$V_{запHe}$
000	000	000	000	000	508	000	000	000	0.481	0.349	0.300	0.400
003	000	014	000	000	509	003	-017	000				
003	000	001	051	000	509	000	050	000				
010	000	026	000	000	511	006	-031	000	0.269	0.282	0.333	0.449
011	005	030	000	-001	511	007	-032	000				
011	000	001	050	000	512	000	050	000				
015	000	018	000	-006	513	004	-022	000				
015	000	001	051	000	513	000	050	000				
019	000	018	000	-018	514	004	-022	000	0.367	0.398	0.367	0.500
020	000	023	000	-021	515	005	-027	000				
021	000	001	051	000	515	000	050	000				
026	000	027	000	-024	516	005	-032	000				
026	000	001	051	000	517	000	050	000				
029	000	017	000	-015	518	003	-020	000	0.398	0.430	0.396	0.545
039	006	057	000	-036	521	012	-063	000	0.238	0.261	0.424	0.586
048	010	087	000	-038	524	020	-097	000				
048	000	000	042	000	524	000	042	000				
049	000	006	000	000	524	001	-007	000	0.358	0.312	0.447	0.620

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θНw	θHe	VзапНw	VзапHe
059	014	044	000	001	528	009	-040	000	0.242	0.235	0.466	0.649
062	018	055	000	001	529	012	-049	000				
062	000	000	051	000	529	000	050	000				
067	000	021	000	001	530	004	-026	000				
068	000	000	050	000	530	000	050	000				
069	000	005	000	000	531	001	-006	000	0.503	0.496	0.479	0.669
079	021	052	000	-012	533	010	-041	000	0.302	0.329	0.490	0.686
089	051	090	000	-014	535	018	-057	000	0.311	0.298	0.497	0.696
099	057	122	000	-013	536	026	-091	000	0.210	0.214	0.500	0.700
108	099	151	000	-013	537	034	-085	000	0.282	0.271	0.500	0.700
118	099	161	000	-014	538	042	-104	000	0.197	0.220	0.500	0.700
128	100	163	000	-017	539	050	-113	000	0.178	0.203	0.500	0.700
140	100	163	000	-020	540	060	-123	000	0.168	0.191	0.500	0.700
153	100	163	000	-023	541	069	-132	000	0.160	0.182	0.500	0.700
165	100	163	000	-025	543	079	-142	000	0.154	0.175	0.500	0.700
177	100	163	000	-027	544	088	-151	000	0.149	0.169	0.500	0.700
189	100	163	000	-028	545	098	-160	000	0.144	0.164	0.500	0.700
201	100	163	000	-030	547	107	-170	000	0.140	0.159	0.500	0.700
213	100	163	000	-031	549	116	-179	000	0.136	0.155	0.500	0.700
225	100	163	000	-032	551	125	-188	000	0.132	0.151	0.500	0.700

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θНw	θHe	VзапНw	VзапHe
237	100	163	000	-033	552	134	-197	000	0.129	0.147	0.500	0.700
249	100	163	000	-035	554	143	-206	000	0.126	0.144	0.500	0.700
261	100	163	000	-035	557	151	-214	000	0.123	0.141	0.500	0.700
273	100	163	000	-036	559	160	-223	000	0.121	0.138	0.500	0.700
285	100	163	000	-037	561	168	-231	000	0.118	0.135	0.500	0.700
297	100	163	000	-038	563	177	-240	000	0.116	0.133	0.500	0.700
309	100	163	000	-039	565	185	-248	000	0.114	0.130	0.500	0.700
321	100	163	000	-039	567	193	-256	000	0.111	0.128	0.500	0.700
333	100	163	000	-040	570	201	-264	000	0.109	0.126	0.500	0.700
346	100	163	000	-041	572	209	-272	000	0.108	0.124	0.500	0.700
358	100	163	000	-041	574	216	-279	000	0.106	0.122	0.500	0.700
366	100	163	000	-042	576	221	-284	000				

Таблица В.2.2 – Итоговые показатели водного баланса за расчетный год

Сутки	Осадки, мм	Испар., мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	ГГВвег, см	Весув, мм	Урожай
366	132	441	396	-131	547	282	-194	000	528	50	0.875

Приложение В.3. Участок III (Cambisols Dystric)

Таблица В.3.1 – Посуточная динамика элементов водного баланса за расчетный 1999 год

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θ_{Hw}	θ_{He}	$V_{запHw}$	$V_{запHe}$
000	000	000	000	000	643	000	000	000				
000	000	000	047	000	643	000	046	000				
002	000	010	000	000	644	001	-011	000	0.366	0.319	0.700	0.900
011	005	041	000	-011	644	003	-039	000				
011	000	000	049	000	644	000	049	000				
012	000	005	000	-001	644	000	-006	000	0.349	0.320	0.700	0.900
016	000	022	000	-009	644	001	-024	000				
016	000	000	049	000	644	000	049	000				
022	000	027	000	-020	645	002	-029	000				
022	000	000	021	000	645	000	020	000	0.312	0.304	0.700	0.900
022	000	000	049	000	645	000	048	000				
028	000	031	000	-018	645	002	-033	000				
028	000	000	049	000	645	000	048	000				
032	000	017	000	-010	646	001	-017	000	0.293	0.299	0.700	0.900
041	009	052	000	-022	646	003	-047	000				
041	000	000	020	000	646	000	020	000	0.264	0.251	0.700	0.900
041	000	000	048	000	646	000	048	000				
048	001	032	000	-007	647	002	-033	000				

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θНw	θHe	VзапНw	VзапHe
048	000	000	049	000	647	000	049	000				
051	000	017	000	-007	647	001	-018	000	0.287	0.290	0.700	0.900
061	014	058	000	-015	647	003	-048	000	0.183	0.184	0.700	0.900
062	018	063	000	-015	647	004	-049	000				
062	000	000	051	000	647	000	051	000				
068	000	025	000	-009	647	002	-027	000				
068	000	000	049	000	647	000	049	000				
071	000	009	000	-006	646	001	-010	000	0.335	0.333	0.700	0.900
081	021	057	000	-023	643	003	-040	000	0.198	0.203	0.700	0.900
091	051	095	000	-022	640	006	-050	000	0.204	0.190	0.700	0.900
100	065	127	000	-020	637	009	-072	000	0.149	0.139	0.700	0.900
110	099	155	000	-019	633	012	-068	000	0.175	0.166	0.700	0.900
120	099	164	000	-021	630	016	-081	000	0.110	0.121	0.700	0.900
132	100	167	000	-024	628	020	-087	000	0.096	0.107	0.700	0.900
144	100	167	000	-026	626	025	-092	000	0.092	0.102	0.700	0.900
156	100	167	000	-028	626	029	-096	000	0.089	0.098	0.700	0.900
168	100	167	000	-029	626	034	-100	000	0.087	0.095	0.700	0.900
180	100	167	000	-030	626	038	-105	000	0.084	0.092	0.700	0.900
192	100	167	000	-031	626	043	-109	000	0.082	0.089	0.700	0.900
205	100	167	000	-032	627	047	-114	000	0.080	0.087	0.700	0.900

Сутки	Осадки, мм	Испарение, мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	θНw	θНе	VзапНw	VзапНе
217	100	167	000	-033	627	051	-118	000	0.078	0.085	0.700	0.900
229	100	167	000	-033	628	056	-123	000	0.076	0.083	0.700	0.900
241	100	167	000	-034	629	060	-127	000	0.074	0.081	0.700	0.900
253	100	167	000	-035	629	064	-131	000	0.072	0.079	0.700	0.900
265	100	167	000	-035	630	069	-135	000	0.071	0.077	0.700	0.900
277	100	167	000	-036	631	073	-140	000	0.069	0.075	0.700	0.900
289	100	167	000	-036	632	077	-144	000	0.067	0.074	0.700	0.900
301	100	167	000	-037	633	081	-148	000	0.066	0.072	0.700	0.900
313	100	167	000	-037	634	085	-152	000	0.065	0.071	0.700	0.900
325	100	167	000	-038	635	089	-156	000	0.063	0.069	0.700	0.900
337	100	167	000	-038	636	093	-160	000	0.062	0.068	0.700	0.900
349	100	167	000	-039	637	096	-163	000	0.061	0.067	0.700	0.900
361	100	167	000	-039	637	100	-167	000	0.060	0.066	0.700	0.900
365	100	167	000	-039	638	102	-168	000				

Таблица В.3.2 – Итоговые показатели водного баланса за расчетный год

Сутки	Осадки, мм	Испар., мм	Полив, мм	КапП, мм	ГГВ, см	ОтГВ, мм	Запас, мм	Баланс, мм	ГГВвег, см	Весув, мм	Урожай
365	132	464	441	-150	635	120	-011	000	643	50	0.947