

Ичитегетсе Инносент

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

4.1.5 – Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре сельскохозяйственных мелиораций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).

Научный
руководитель
(консультант)

Максимов Сергей Алексеевич,
доктор технических наук, доцент, заведующий отделом
мелиорации земель ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н.
Костякова»

Официальные
оппоненты:

Баев Олег Андреевич, доктор технических наук, доцент,
начальник Гидротехнического отдела Федерального
государственного бюджетного научного учреждения
«Российский научно-исследовательский институт
проблем мелиорации»

Турапин Сергей Сергеевич, кандидат технических
наук, врио директора ФГБНУ Всероссийский научно-
исследовательский институт систем орошения и
сельхозводоснабжения «Радуга»

Ведущая
организация

ФГБНУ «Волжский научно-исследовательский институт
гидротехники и мелиорации»

Защита диссертации состоится 24.11.2026 в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 35.2.030.07

кандидат технических наук, доцент _____ Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Сельское хозяйство страны в целом обеспечивает более 30% ВВП и занятость свыше 85% активного населения. 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.

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.

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. 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. Дальнейшее развитие она получила в трудах А.Д. Брудастов, С.Ф. Аверьянов, В.В. Ведерникова, В.А. Ковды, Б.С. Маслова, Б.А. и Б.Б. Шумаковых, Б.М. Кизяева, И.П. Айдарова, А.И. Голованов, В.В. Шабанов, Ю.П. Добрачёва, Н.Н. Дубенка, Л.М. Рекса, Н.М. Решёткиной, Л.В. Кирейчевой, И.П. Кружилина, С.Д. Исаевой, А.П. Лихацевича, В.П. Максименко, Ю.Н. Никольского, Б.Ф. Никитенкова, В.Н. Краснощёкова, С.А. Максимова и др. Вопросам мелиорации и орошения в Бурунди посвящены работы Clément Mathieu, В.В. Шабанова, J. Doorenbos, W.O. Pruitt, R.A. Feddes, P.G. Jarvis, M.A. Celia, Nestor Niyonzima, Prosper Manirakiza.

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. Опыт общинного управления оросительными

системами в Буркина-Фасо показывает, что их устойчивость ограничена слабым эксплуатационным менеджментом после передачи управления местным фермерским организациям. 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. 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, 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, Пакистане и других странах со сходным дефицитом данных, 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, 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. Польшину, – 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 н.у.м.). Три расчётных участка по ландшафтной катене реки Русизи (фации выделены по Б.Б. Польшину): 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 района 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 н.у.м.) 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе установлено, что регион Имбо (775–1000 м н.у.м.) характеризуется наиболее высокими на территории Бурунди температурами воздуха (23–24°C) и наиболее высокими значениями эвапотранспирации в сухой сезон (5,40–6,88 мм/сут); выделены три типа почв ландшафтной катены, различающиеся глубиной залегания грунтовых вод, что обосновывает дифференцированный подход к режиму орошения.

Во второй главе показано, что ирригационный потенциал региона Имбо освоен лишь на 33% из 122 701 га; индикативная оценка по радиационному балансу выявила более чем пятикратный разрыв между теоретически достижимой (18–19 т/га) и реалистичной при существующем уровне

агротехнологии (1,8–2,0 т/га) продуктивностью кукурузы, что определило научный пробел в обосновании режимов орошения кукурузы для условий региона Имбо.

В третьей главе обоснована применимость данных реанализа AgERA5 для расчёта режимов орошения. Сопоставление с наблюдениями шести метеостанций (Рисунок 1) и проверка по метеостанции Бужумбура за 1991–2020 гг. выявили систематические расхождения (Таблица 1).

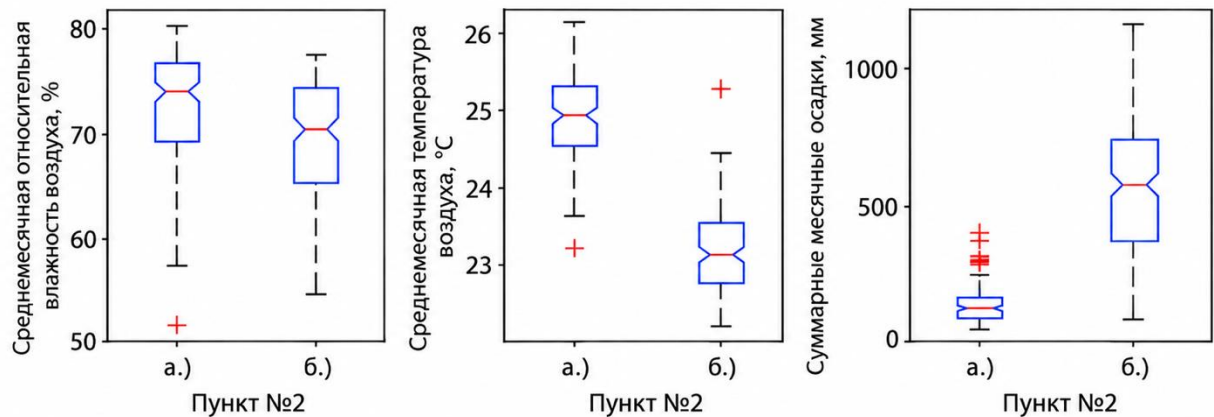


Рисунок 1. Блочные диаграммы сопоставления а) по данным метеонаблюдений; б) по данным реанализа например Пункт № 2 – Имбо (Семс)

Таблица 1. Систематические расхождения AgERA5 и данных метеостанции Бужумбура (1991–2020 гг.)

Параметр	Расхождение AgERA5 относительно наблюдений
Температура воздуха	занижение на 0,5°C
Относительная влажность	занижение на 7%
Суммарные осадки	занижение на 17–20%

Пространственный анализ изменения климата в регионе Имбо за 1991–2024 гг. (Рисунок 2) выявил территориальную неоднородность потепления – от +0,3–0,4°C у озера Танганьика до +0,8–0,9°C на центральном плато – при слабой тенденции к росту годовой суммы осадков. Применимость реанализа AgERA5 дифференцирована по территории и сезонам года: в удалённых от станций регионах и в сухой сезон использование AgERA5 обосновано, во влажный сезон приоритет сохраняется за станционными наблюдениями.

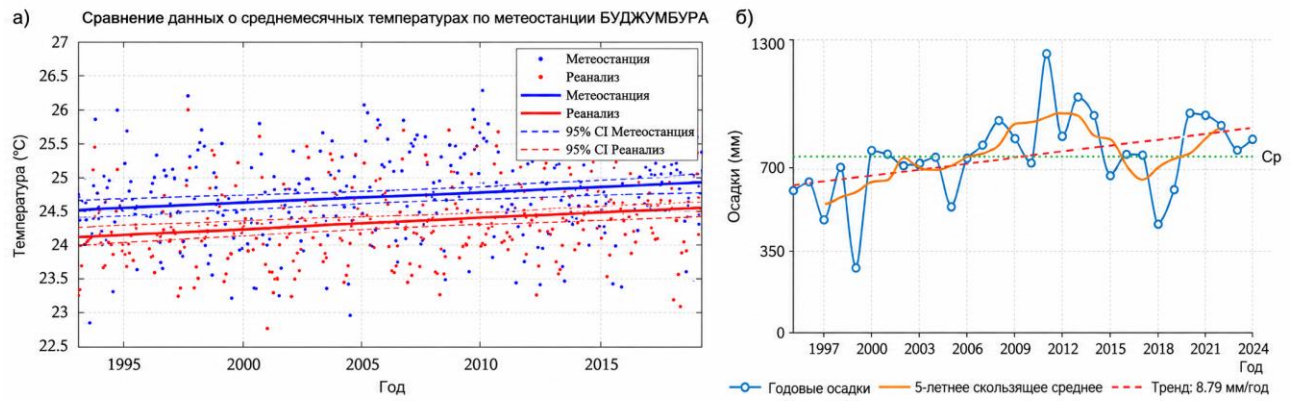


Рисунок 2. Территориальная неоднородность изменения температуры воздуха (а) и тенденция изменения осадков в регионе Имбо (б) по данным реанализа AgERA5

В четвёртой главе выполнен расчёт режима орошения кукурузы по методике FAO CROPWAT 8.0. Водопотребление культуры определяется как $ET_c = ET_0 \times K_c$, где ET_0 рассчитывается по уравнению Пенмана–Монтейта (FAO-56):

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

а оросительная норма – из уравнения баланса влаги в корнеобитаемом слое $\Delta\omega = -E_c + O_c + O_p$, откуда

$$O_p = K_c \cdot ET_0 - P_{эф} \pm g., \quad (2)$$

Суммарное водопотребление за вегетационный период (120 суток) составило $ET_c = 434,8$ мм, эффективные осадки – 127,2 мм, теоретическая потребность в орошении, 312,0 мм, одинаково для всех участков. Оросительные нормы дифференцированы по типам почв (Таблица 2, Рисунок 3).

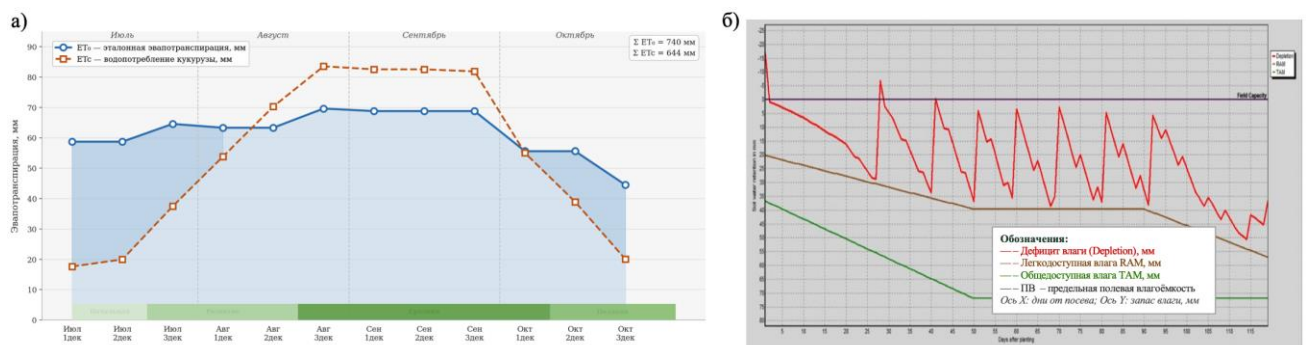


Рисунок 3. а) ET_0 и ET_c по декадам вегетационного периода, мм/сут; б) режим орошения кукурузы, например для Уч. I Солончаки глеевые (SCgl): динамика

дефицита влаги, легкодоступной (RAM) и общедоступной (TAM) влаги по дням от посева (CROPWAT 8.0)

Таблица 2. Режимы орошения кукурузы по методу FAO CROPWAT 8.0

Участок	Тип почвы	Норма нетто, мм	Норма брутто, мм	Поливная норма нетто, мм	Число поливов	Эффективность графика, %
I	Солончаки глеевые	304	337,8	38	8	97,9
II	Глейсоли молликовые	385	427,8	35	11	99,7
III	Камбисоли дистрические	448	497,8	32	14	85,6

На всех участках $K_s = 1,00$, $E_{Ta} = 100\%$ потенциальной; расчётная урожайность – 8–11 т/га. Модель не учитывает водообмен с подстилающими горизонтами, что исключает капиллярное подпитывание при неглубоком залегании грунтовых вод.

В пятой главе выполнен расчёт режимов орошения по модели влагопереноса А.И. Голованова, впервые применённой для условий региона Имбо:

$$C \frac{dH}{dt} = \frac{d}{dx} \left(K_{\omega} \frac{dH}{dx} \right) - \bar{e}_k, \quad K_{\omega} = k_f \left(\frac{\omega - \omega_M}{m - \omega_M} \right)^5, \quad (3)$$

где H – полный напор почвенной влаги, C – коэффициент удельной влагоёмкости, $\bar{e}_k$ – интенсивность отбора влаги корнями.

Испаряемость рассчитывается по формуле Н.Н. Иванова $E_0 = 0,0018 \cdot (25+t)^2 \cdot (100-\alpha)$, а переход к суммарному испарению культуры – как $E_{Ts} = \beta \cdot E_0$ ($\beta = K_s$), что физически эквивалентно методу Пенмана–Монтейта.

В отличие от CROPWAT, модель явно учитывает водообмен с грунтовыми водами (Рисунок 4, Таблица 3).

Установлено, что на участке I водообмен минимален (–7 мм) при участии грунтовых вод на глубине 0,8–1,2 м; на участке II наблюдается слабое капиллярное подпитывание (+4 мм); на участке III капиллярное подпитывание отсутствует, а нисходящий водообмен максимален (–149 мм).

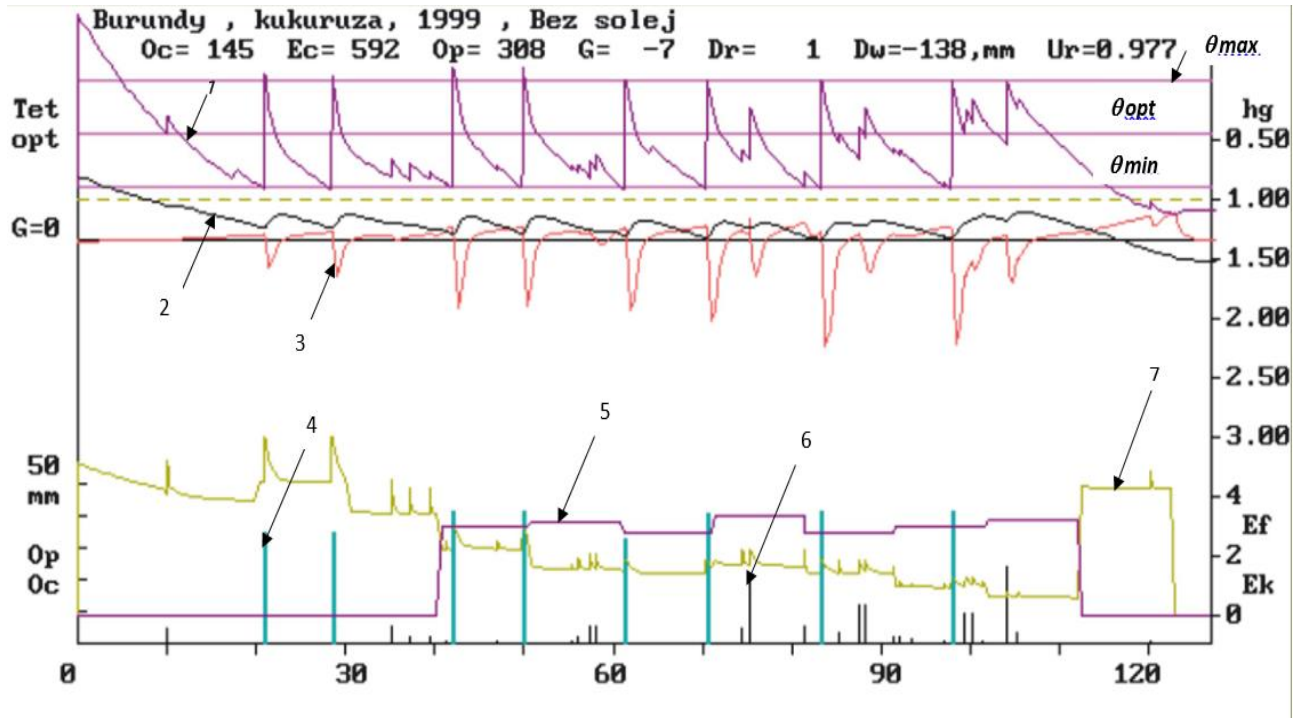


Рис. 4. Ретроспективный расчёт режима орошения кукурузы для 1999 года (75% обеспеченности): динамика влажности почвы, водообмена на нижней границе, поливов и осадков, например ля Уч. I Солончаки глеевые (SCgl).

Таблица 3. Режимы орошения кукурузы по модели влагопереноса А.И. Голованова (1999 г., 75% обеспеченности)

Участок	Оросительная норма, мм	Число поливов	Водообмен на нижней границе, мм	Характер водообмена
I	308	8	-7	слабый нисходящий при участии ГВ
II	341	10	+4	слабое капиллярное подпитывание
III	461	14	-149	интенсивный нисходящий, ГВ не участвуют

Направление и величина водообмена закономерно связаны с глубиной залегания грунтовых вод. Расчёт по многолетнему ряду (1997–2016 гг.) подтвердил результаты расчёта на характерный год: 311, 396 и 441 мм для участков I, II и III.

В шестой главе проведено сравнение 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.): расхождение закономерно связано с глубиной залегания грунтовых вод и носит немонотонный характер по катене (Таблица 4, Рисунок 5).

Таблица 4 – Сопоставление оросительных норм по двум методам

Участок	CROPWAT 8.0, мм	Голованов, мм	Расхождение, %
I	304	308	+1,3
II	385	341	–11,4
III	448	461	+2,9

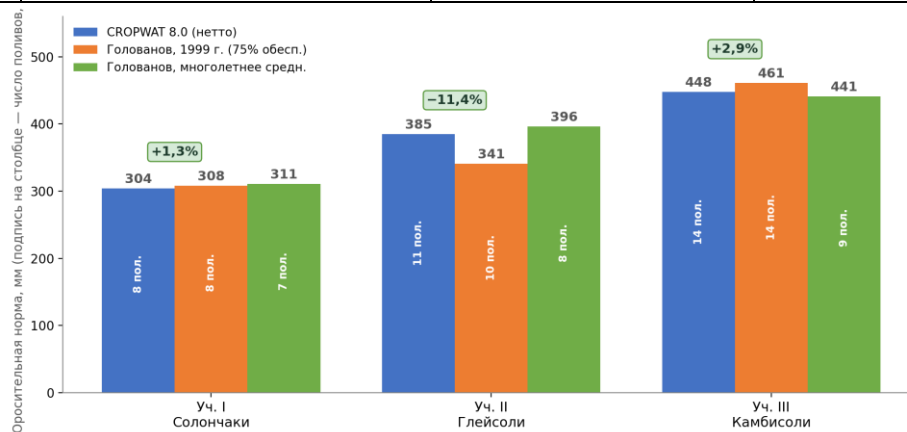


Рисунок 5. Нормы орошения кукурузы по фациям ландшафтной катены региона Имбо: сопоставление CROPWAT 8.0 и модели А.И. Голованова (нетто- и брутто-нормы)

Максимальное расхождение на участке II (–11,4%) объясняется тем, что модель Голованова учитывает капиллярное подпитывание, а CROPWAT 8.0 – нет; на участках с активным водообменом (I) и с его отсутствием (III) методы дают близкие результаты (расхождение не более 3%). Перерасход воды при использовании CROPWAT 8.0 без учёта уровня грунтовых вод на участке II оценён в 490 м³/га.

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 ($0,75-0,9^{\circ}\text{C}$ 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 станционных 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 станционных 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 станционные 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 станционными наблюдениями.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Максимов С.А., Головинов Е.Э., **Ичитегетсе И.** Метеоданные реанализа для обоснования мелиоративного режима орошаемых земель Республики Бурунди // Мелиорация и водное хозяйство. – 2024. – № 3. – С. 19–24. – DOI: 10.32962/0235-2524-2024-3-19-24.
2. **Ичитегетсе И.**, Максимов С.А. Текущее состояние и перспективы развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди // Природообустройство. – 2025. – № 5. – С. 39–46. – DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-39-46.
3. Максимов С.А., Головинов Е.Э., **Ичитегетсе И.** Оценка влияния тенденций изменения климата на обоснование оросительных норм в условиях Республики Бурунди // Природообустройство. – 2026. – № 2. – С. 24–30. – DOI: 10.26897/1997-6011-2026-2-24-30.
4. **Ичитегетсе И.** Расчет режима орошения кукурузы для различных типов почв агроклиматического региона Имбо (Республика Бурунди) с использованием модели FAO CROPWAT. // Природообустройство. – 2026. – № 3. – С. 62–71. – DOI: 10.26897/1997-6011-2026-3-62-71
5. Максимов С.А., **Ичитегетсе И.** Расчет режима орошения кукурузы для условий района Имбо Республики Бурунди. // Мелиорация и водное хозяйство. – 2026. – № 3. – С. 35–39. DOI: 10.32962/0235-2524-2026-35-39

Публикации в сборниках трудов конференций:

6. **Ичитегетсе И.** Сравнительный анализ методов расчёта эффективных осадков для расчёта режима орошения кукурузы в регионе Имбо Республики Бурунди // Материалы международной научной конференции, посвящённой 160-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – Москва, 2025. – С. 185–188.
7. Максимов С.А., Головинов Е.Э., **Ичитегетсе И.** Установление возможности использования климатических данных реанализа для обоснования мелиоративного режима орошаемых земель Республики Бурунди // Мелиорация будущего: тренды, инновации и технологии в сельском хозяйстве. Материалы международного форума молодых учёных, посвящённого 100-летию образования ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова. – Москва, 2024. – С. 55–64.
8. **Icitegetse I.**, Zaitsev A.A. Evaluation des besoins en irrigation de la culture du maïs dans le bassin du rivière Kaburantwa en République du Burundi // Материалы международной научной конференции, посвящённой 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. – Москва, 2023. – С. 427–430.