

Оригинальная статья

УДК 631.67:633.15(574.1)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-62-71>

РАСЧЕТ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОЧВ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ИМБО (РЕСПУБЛИКА БУРУНДИ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ FAO CROPWAT

И. Ичигетсе

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

citegetseinnocent@gmail.com; ORCID: 0009-0004-5052-4803

Аннотация. Рациональное использование водных ресурсов имеет критическое значение для устойчивого сельскохозяйственного производства в регионах с выраженной сезонностью осадков, к которым относится Республика Бурунди. Исследования направлены на определение потребности в воде кукурузы и разработку оптимального режима орошения с использованием методологии ФАО, реализованной в модели CROPWAT 8.0, применительно к трем расчетным участкам агроклиматического региона Имбо с различными типами почв. Участки I, II и III соответствуют почвам типа Солончаки (SCgl), Глейсоли (GLmo) и Камбисоли (CMdy) соответственно. Климатические данные получены с метеостанции Бужумбура. Дата посева – 1 июля, дата уборки – 28 октября, продолжительность вегетационного периода – 120 суток. Эталонная эвапотранспирация рассчитана по методу Пенмана-Монтейта. Суммарное водопотребление кукурузы ETc составило 434.8 мм; эффективные осадки в вегетационный период – 127.2 мм (29.2%); теоретическая потребность кукурузы в воде по методу CWR (Crop Water Requirement) – 312.0 мм – одинакова для всех трех участков. Графики поливов, сформированные с учетом реальных почвенных параметров каждого участка, существенно различаются: участок I (Солончаки, продуктивные влагозапасы (Total Available Water, TAW) = 120 мм/м) – 8 поливов нормой 38 мм, брутто – 337.8 мм, эффективность графика орошения (Efficiency irrigation schedule) – 97.9%; участок II (Глейсоли, TAW = 120 мм/м) – 11 поливов нормой 35 мм, брутто 427.8 мм, эффективность графика орошения составила 99.7%; участок III (Камбисоли, TAW = 80 мм/м) – 14 поливов нормой 32 мм, брутто – 497.8 мм, эффективность графика орошения составила 85.6%. Предложены практические рекомендации по оптимизации режима орошения кукурузы для каждого типа почв.

Ключевые слова: CROPWAT, потребность в воде, режим орошения, кукуруза, регион Имбо, Бурунди, Солончаки, Глейсоли, Камбисоли, эвапотранспирация

Для цитирования: Ичигетсе И. Расчет режима орошения кукурузы для различных типов почв агроклиматического региона ИМБО (Республика Бурунди) с использованием модели FAO CROPWAT. Природообустройство. 2026;Т.19(3):62-71. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-62-71>

Scientific article

CALCULATION OF IRRIGATION REGIME FOR MAIZE ON DIFFERENT SOIL TYPES OF THE IMBO AGRO-CLIMATIC REGION (REPUBLIC OF BURUNDI) USING THE FAO CROPWAT MODEL

I. Icitetse

A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russian Federation

ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Abstract. Rational use of water resources is critical for sustainable agricultural production in regions with pronounced rainfall seasonality, such as the Republic of Burundi. This study aims to determine the water requirements of maize and develop an optimal irrigation regime using the FAO methodology implemented in the CROPWAT 8.0 model for three calculation plots in the Imbo agro-climatic region with different soil types. Plots I, II and III correspond to Solonchaks (SCgl), Gleysols (GLmo) and Cambisols (CMdy) soils, respectively. Climatic data were obtained from the Bujumbura meteorological station. Planting date: 1 July; harvest: 28 October; growing season: 120 days. Reference evapotranspiration

was calculated using the Penman-Monteith method. Total maize ETc was 434.8 mm; effective rainfall during the growing season – 127.2 mm (29.2%); the theoretical crop water requirement (CWR) of maize – 312.0 mm – is identical for all three plots. Irrigation schedules generated with actual soil parameters differ substantially: Plot I (Solonchaks, total available water (TAW) = 120 mm/m) – 8 irrigations at 38 mm net, gross 337.8 mm, efficiency 97.9%; Plot II (Gleysols, TAW = 120 mm/m) – 11 irrigations at 35 mm net, gross 427.8 mm, efficiency 99.7%; Plot III (Cambisols, TAW = 80 mm/m) – 14 irrigations at 32 mm net, gross 497.8 mm, efficiency 85.6%. Practical recommendations for optimising the maize irrigation regime for each soil type are proposed.

Keywords: CROPWAT, water requirement, irrigation regime, maize, Imbo region, Burundi, Solonchaks, Gleysols, Cambisols, evapotranspirati

For citation: Icitetse I. Calculation of irrigation regime for maize on different soil types of the Imbo agro-climatic region (republic of Burundi) using the FAO CROPWAT model. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):62-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-62-71>

Введение. Кукуруза (*Zea mays* L.) является в Республике Бурунди одной из основных продовольственных культур, играющей ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны [1, 2]. Развитие орошаемого земледелия в Бурунди осложнено экономическими, технологическими и природными факторами. Неравномерность и сезонность распределения осадков, продолжительность засушливых периодов обуславливают необходимость применения научно обоснованных методов орошения [3].

Агроклиматический регион Имбо, расположенный в Западной рифтовой долине Бурунди вдоль реки Русизи и озера Танганьика, характеризуется значительным разнообразием почвенного покрова. На отдельных участках равнины встречаются Солончаки (SCgl) с близким залеганием минерализованных грунтовых вод, Глейсоли (GLmo) с периодическим переувлажнением, а также Камбисоли (CMdy) – умеренно развитые почвы на первых надпойменных террасах. Это разнообразие, пространственная и генетическая неоднородность определяют существенные различия гидрофизических свойств почв и, следовательно, режимов орошения [10, 11, 13].

Методология ФАО, реализованная в модели CROPWAT 8.0 [7, 8], является стандартным международным инструментом для расчета потребности культур в воде и планирования орошения. Модель широко применяется в условиях тропического и субтропического климата [9, 16-18] и обеспечивает систематический подход к оценке водопотребления растений на основе климатических, почвенных и биологических данных.

Вместе с тем для условий агроклиматического региона Имбо расчеты водопотребления кукурузы с дифференциацией по типам почв ранее не производились, что определяет актуальность работы.

Цель исследований: расчет водопотребления кукурузы в агроклиматическом регионе

Имбо Республики Бурунди и разработка оптимального режима орошения методом FAO CROPWAT 8.0 для трех расчетных участков с различными типами почв (Солончаки, Глейсоли, Камбисоли).

Материалы и методы исследований.

1. Место исследования. Район исследований – равнина Имбо в западной части Республики Бурунди (высота 775-1000 м н.у.м.). Регион простирается вдоль озера Танганьика и реки Русизи. Среднегодовое количество осадков составляет около 800 мм, среднегодовая температура – 23°C. Для расчетов выделены три участка с различными типами почв, характерными для данного региона:

Участок I – Солончаки глеевые (Solonchaks SCgl). Почвы с высоким содержанием легкорастворимых солей, формирующиеся в условиях высокой испаряемости при неглубоком залегании минерализованных грунтовых вод, характеризуются ограниченной глубиной корнеобитаемого слоя (60 см) и небольшим коэффициентом фильтрации (10 мм/сут.).

Участок II – Глейсоли молликовые (Gleysols GLmo), формирующиеся в условиях периодического переувлажнения. Диагностическим признаком является глеевый горизонт. Характеризуются значением общедоступной для растения влаги – TAW = 120 мм/м, крайне малыми коэффициентами фильтрации (около 2 мм/сут.), глубиной корнеобитаемого слоя 60 см.

Участок III – Камбисоли дистрические (Cambisols CMdy). Умеренно развитые почвы со слабой дифференциацией профиля, обладают умеренным плодородием. TAW = 80 мм/м, глубина корнеобитаемого слоя – 60 см, коэффициент фильтрации – 4 мм/сут.

2. Методология CROPWAT 8.0

Методологический подход основан на использовании модели CROPWAT 8.0, разработанной Отделом развития земельных и водных

ресурсов ФАО [7, 8]. Расчет включает в себя следующие основные компоненты.

1. Расчет эталонной эвапотранспирации (ET_o) по методу Пенмана-Монтейта:

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T}\right) \cdot u_2 \cdot \delta e}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}, \quad (1)$$

где ET_o – эталонная эвапотранспирация (мм/сут.); Δ – скорость изменения давления насыщенного пара (кПа/°C); R_n – чистая радиация поверхности (МДж/м²/сут.); G – тепловой поток в почве (МДж/м²/сут.); T – температура воздуха на высоте 2 м (°C); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м (м/с); δe – дефицит давления пара (кПа); γ – психрометрическая постоянная (кПа/°C).

2. Определение потребности культуры в воде (ETc):

$$ETc = ET_o \times Kc, \quad (2)$$

где ET_o – эталонная эвапотранспирация по формуле (1); Kc – коэффициент культуры, зависящий от фазы развития.

3. Расчет потребности в орошении (IR):

$$IR = ETc - Peff, \quad (3)$$

где IR – потребность в орошении (мм); $Peff$ – эффективные осадки (мм).

4. Формирование графика поливов с учетом ежедневного водного баланса почвы, параметров фильтрации и пороговых значений истощения влаги в корнеобитаемом слое.

Для расчета водопотребления кукурузы использованы климатические данные метеостанции Бужумбура (3.32° ю.ш., 29.32° в.д., высота – 783 м н.у.м.).

Климат региона исследований характеризуется относительно стабильным температурным

режимом в течение года (табл. 1): средняя минимальная температура – 19.0°C, максимальная – 29.7°C. Среднегодовая $ET_o = 4.39$ мм/сут. Сухой период (июнь-август) отличается повышенными значениями ET_o (4.44-4.99 мм/сут.) при минимальных осадках, что определяет необходимость орошения кукурузы в летний сезон.

Эффективные осадки ($Peff$) определены методом Службы охраны почв США (USDA Soil Conservation Service), реализованным в CROPWAT 8.0 (табл. 2):

$$Peff = Pmon (125 - 0.2 Pmon) / 125 \text{ при } Pmon \leq 250 \text{ мм};$$

$$Peff = 125 + 0.1 Pmon \text{ при } Pmon > 250 \text{ мм}, \quad (4)$$

где $Pmon$ – суммарные месячные осадки (мм/мес.).

Суммарные годовые осадки – 775.9 мм, эффективные – 641.2 мм. В вегетационный период (июль-октябрь – 120 суток) эффективные осадки составили 127.2 мм: июль – 4.5, август – 28.8, сентябрь – 54.3, октябрь – 44.5 мм. Крайне малое количество осадков в июле-августе обуславливает высокую потребность в орошении в начале вегетации.

Параметры, характеризующие биологические свойства кукурузы, приняты по стандартному файлу ФАО «MAIZE (Grain)» с датой посева 01.07 и уборки 28.10. Коэффициенты культуры Kc приняты по ФАО-56 [7].

Динамика коэффициента культуры Kc отражает физиологические особенности развития кукурузы: минимальное водопотребление в начальной фазе ($Kc = 0.15$) обусловлено малой листовой поверхностью и слабым транспирационным потоком; нарастание Kc в фазе развития соответствует интенсивному

Таблица 1. Климатические параметры региона исследований (ст. Бужумбура)

Table 1. Climatic parameters of the study region (Bujumbura station)

Месяц / Month	Мин. т-ра, °C / Min temperature	Макс. т-ра, °C / Max temperature	Влажн., % / Moisture, %	Ветер, м/с / Wind, m/s	Солнце, ч / Sun, h	Рад., МДж/м²/сут / Rad., MJ/m²/day	ET_o , мм/сут / ET_o , mm/day
Январь / January	19.4	29.4	73	2.0	5.2	17.4	4.08
Февраль / February	20.1	31.2	70	1.7	5.2	17.7	4.32
Март / March	19.6	29.3	75	2.2	5.5	18.1	4.24
Апрель / April	19.4	29.3	74	2.2	5.3	17.0	4.04
Май / May	19.1	30.4	70	2.4	6.2	17.2	4.29
Июнь / June	17.8	30.0	66	2.3	7.6	18.4	4.44
Июль / July	17.1	29.4	61	2.9	8.2	19.5	4.95
Август / August	19.1	29.2	64	3.0	7.6	19.9	4.99
Сентябрь / September	19.1	30.0	68	2.4	6.7	19.6	4.75
Октябрь / October	18.7	30.3	68	2.6	5.6	18.2	4.71
Ноябрь / November	19.1	28.8	75	2.1	4.9	16.9	3.95
Декабрь / December	19.2	29.2	75	2.1	5.0	16.8	3.96
Среднее / Average	19.0	29.7	70	2.3	6.1	18.1	4.39

росту вегетативной массы; максимум в средней фазе ($K_c = 1.15$) совпадает с периодом цветения и формирования зерна, когда суммарное водопотребление культуры достигает наибольших значений; снижение в позднюю фазу ($K_c = 0.15$) отражает постепенное отмирание листового аппарата и уменьшение транспирации в период созревания.

Таблица 2. Среднемесячные осадки и эффективные осадки (ст. Бужумбура)

Table 2. Average monthly precipitation and effective precipitation (Bujumbura station)

Месяц / Month	Осадки, мм / Precipitation, mm	Эфф. осадки, мм / Effective precipitation, mm
Январь / January	65.8	58.9
Февраль / February	13.9	13.6
Март / March	147.1	112.5
Апрель / April	92.5	78.8
Май / May	25.3	24.3
Июнь / June	0.3	0.3
Июль / July	4.5	4.5
Август / August	30.3	28.8
Сентябрь / September	60.1	54.3
Октябрь / October	48.2	44.5
Ноябрь / November	128.3	102.0
Декабрь / December	159.6	118.8
Итого / Total	775.9	641.2

Критическое истощение и фактор реакции урожайности (K_y) характеризуют чувствительность кукурузы к водному дефициту. Критическое истощение определяет допустимую долю продуктивных влагозапасов (TAW), которую культура может использовать без снижения водопотребления: значение $p = 0.55$ в начальной и средней фазах означает, что полив назначается при расходе 55% TAW, тогда как в позднюю фазу допускается более глубокое иссушение ($p = 0.80$): в период созревания кукуруза менее требовательна к влагообеспеченности. Фактор реакции урожайности K_y показывает, насколько снижается урожайность при возникновении водного дефицита в каждой фазе: низкие значения в начальной фазе и фазе развития ($K_y = 0.40$) указывают на относительную устойчивость кукурузы к умеренному дефициту воды на ранних этапах, тогда как максимальное значение $K_y = 1.30$ в средней фазе подтверждает, что период цветения и налива зерна является критическим: даже кратковременный водный стресс в это время ведет к существенному снижению урожайности. В позднюю фазу $K_y = 0.50$, что отражает умеренную чувствительность при созревании. Суммарный K_y за сезон составляет 1.25.

Высота растения (2.00 м) задается в CROPWAT как единый параметр культуры для расчета аэродинамического сопротивления посева и не зависит от фазы развития.

Таблица 3. Фенологические параметры кукурузы в CROPWAT 8.0 (MAIZE FAO Book.CRO)

Table 3. Phenological parameters of maize in CROPWAT 8.0 (MAIZE FAO Book.CRO)

Параметр / Parameter	Нач. Фаза / Initial phase	Фаза развития / Developmental phase	Сред. фаза (цветение и налив зерна) / Middle phase (flowering and ripening of grain)	Поздн. фаза (созревание) / Late phase (maturation)
Длительность, дней / Duration, days	15	35	60	30
K_c	0.15	0.15 → 1.15	1.15	0.15
Глубина корней, м / Root depth, m	0.30	0.30 → 1.00	1.00	1.00
Критич. Истощение / Critical exhaustion	0.55	0.55	0.55	0.80
Фактор реакции урожайности / Yield response factor	0.40	0.40	1.30	0.50
Высота растения, м / Plant height, m	2.00			

Таблица 4. Почвенные параметры расчётных участков (входные данные CROPWAT 8.0)

Table 4. Soil parameters of the calculated plots (input data of CROPWAT 8.0)

Параметр / Parameter	Участок I / Plot I	Участок II / Plot II	Участок III / Plot III
Тип почвы / Soil type	Solonchaks (SCgl)	Gleysols (GLmo)	Cambisols (CMdy)
TAW (ПВ – ВЗ), мм/метр / TAW (SM – MR), mm / meter	120	120	80
Глубина корнеобитаемого слоя, см / Depth of the root layer, cm	60	60	60
Начальная влажность почвы, % / Initial soil moisture, %	55	50	50
Нач. величина доступной влаги, мм/метр / Initial available moisture value, mm / meter	54	60	40

Для ввода почвенных параметров расчетных участков в CROPWAT 8.0 использован формат: TAW (мм/м), максимальная скорость фильтрации (мм/сут.), максимальная глубина корнеобитания (см), начальное истощение влаги (%).

Начальная влажность почвы, определяемая к моменту посева (начало июля): 55% для участка I (Солончаки) соответствует более сухим условиям пойменного участка в начале сухого сезона; 50% для участков II и III отражает умеренное иссушение почвы к началу вегетации. Ограничение глубины корнеобитания 60 см, отраженное в таблице 4 (при биологическом потенциале культуры 100 см по таблице 3), обусловлено почвенными свойствами каждого участка: засоленным горизонтом на участке I, глеевым горизонтом на участке II и плотным камбиковым горизонтом на участке III.

Планирование режима орошения для всех трех участков выполнено в CROPWAT 8.0 со следующими настройками: время полива – при достижении 100% критического допустимого истощения; норма подачи – фиксированная (38 мм для участка I, 35 мм – для участка II, 32 мм – для участка III). В настройках CROPWAT задан параметр Field efficiency (КПД техники полива) – 90% для всех участков: это отношение поливной нормы нетто к брутто, характеризующее потери при транспортировке и распределении воды. Отдельно CROPWAT рассчитывает Efficiency irrigation schedule (эффективность графика орошения) – показатель, отражающий долю оросительной воды, реально использованной культурой с учетом потерь на глубокий дренаж

и поверхностный сток. Значения Efficiency irrigation schedule приведены в итоговых строках таблиц 6-8. Различие в фиксированных поливных нормах нетто определяется емкостью корнеобитаемого слоя каждого типа почвы.

Результаты и их обсуждение.

1. Водопотребление кукурузы. Суммарное водопотребление ET_c и потребность по методу CWR рассчитаны на основе климатических данных и параметров культуры и не зависят от типа почвы, поэтому одинаковы для всех трех участков.

Анализ результатов позволяет выделить следующие особенности. В начальной фазе (1-15 сутки) водопотребление является минимальным: 0.72 мм/сут. при $K_s = 0.15$, что обусловлено малой листовой поверхностью. В фазе развития (16-50 сутки) K_s линейно возрастает от 0.15 до 1.15, ET_c достигает 3.78 мм/сут. к концу фазы. В средней фазе (51-90 сутки) водопотребление является максимальным: $ET_c = 5.20-5.61$ мм/сут. при $K_s = 1.04-1.14$ – период формирования урожая, наиболее критичный к водному стрессу. В позднюю фазу (91-120 сутки) ET_c снижается до 1.18 мм/сут.

Суммарное ET_c за 120-суточный период составляет 434.8 мм, эффективные осадки за вегетацию – 127.2 мм (29.2% от ET_c). Теоретическая потребность в орошении по CWR составляет 312.

2. Режим орошения. Для всех трех расчетных участков коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$ и относительная эвапотранспирация $ET_a/ET_c = 100\%$ на протяжении всего вегетационного периода. Данный результат закономерен и обусловлен выбранной стратегией орошения: в модели FAO-56 K_s остается равным единице

Таблица 5. Потребность кукурузы в воде по декадам вегетационного периода (идентично для участков I, II, III)

Table 5. Water demand for maize by decades of the growing season (identical for plots I, II, III)

Месяц / Month	Дек. / Decade	Фаза / Phase	K_s	ET_c , мм/сут. / ET_c , mm / day	ET_c , мм/дек. / ET_c , mm / dec.	Эфф. ос., мм/дек. / Effective precipitation, mm / dec.	Потр. орош., мм/дек. / Cons. irrigation, mm / dec
Июль / July	1	Нач. / Initial	0.15	0.72	7.2	0.4	6.7
Июль / July	2	Разв. / Develop.	0.19	0.95	9.5	0.6	8.9
Июль / July	3	Разв. / Develop.	0.46	2.29	25.2	3.6	21.6
Август / August	1	Разв. / Develop.	0.76	3.78	37.8	6.9	30.9
Август / August	2	Сред. / Middle	1.04	5.20	52.0	9.6	42.4
Август / August	3	Сред. / Middle	1.14	5.61	61.8	12.4	49.3
Сентябрь / September	1	Сред. / Middle	1.14	5.52	55.2	16.4	38.8
Сентябрь / September	2	Сред. / Middle	1.14	5.43	54.3	19.8	34.5
Сентябрь / September	3	Поздн. / Late	1.13	5.36	53.6	18.1	35.5
Октябрь / October	1	Поздн. / Late	0.89	4.22	42.2	13.8	28.4
Октябрь / October	2	Поздн. / Late	0.56	2.65	26.5	11.7	14.8
Октябрь / October	3	Поздн. / Late	0.27	1.18	9.5	13.9	0.0
Итого / Total					434.8	127.2	312.0

до тех пор, пока фактическое истощение почвенной влаги не превышает порога критического истощения. Поскольку полив в CROPWAT назначается в момент достижения этого порога, истощение никогда не переходит в зону стресса, и фактическая эвапотранспирация E_{Ta} совпадает с потенциальной E_{Ts} . Таким образом, $K_s = 1.00$ подтверждает, что разработанные режимы орошения полностью обеспечивают потребности кукурузы в воде на всех трех участках, снижение урожайности не прогнозируется.

2.1. Участок I – Солончаки SCgl

Расчет показал 8 поливов с постоянной нормой 38 мм нетто (42.2 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 1 июля, первый день вегетации, в связи с начальным дефицитом почвенной влаги, составившим 57% TAW. Интервалы между поливами варьируют от 9 до 27 суток: наибольшие значения характерны для начальной фазы, когда водопотребление культуры является минимальным, наименьшие приходятся на среднюю фазу, совпадающую с максимальными значениями E_{Ts} . Суммарная оросительная норма нетто составила 304.0 мм, брутто – 337.8 мм.

Потери при орошении являются незначительными и составляют 6.3 мм. Все осадки вегетационного периода оказались эффективными, потери осадков на поверхностный сток отсутствуют. Эффективность графика орошения составила 97.9%. Дефицит влаги в почве к моменту уборки составил 36.4 мм. Снижения урожайности не прогнозируется: на протяжении всего вегетационного периода коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$, что свидетельствует об отсутствии водного стресса и полном удовлетворении потребностей культуры в воде.

2.2. Участок II – Глейсоли GLmo

Для участка II расчет показал 11 поливов с постоянной нормой 35 мм нетто (38.9 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 3 июля в связи с начальным истощением почвенной влаги 55% TAW. Интервалы между поливами варьируют от 6 до 26 суток: наибольшие в начальную фазу при малом водопотреблении, наименьшие в среднюю фазу при максимальных значениях E_{Ts} . Суммарная оросительная норма нетто составила 385.0 мм, брутто – 427.8 мм.

Потери при орошении составили 1.2 мм, что объясняется крайне малой скоростью вертикальной фильтрации почвы, ограничивающей влагоперенос ниже корнеобитаемого слоя. Все осадки вегетационного периода оказались эффективными: суммарные эффективные осадки совпадают с фактическими и составили 143.2 мм. Эффективность графика орошения составила 99.7%. Дефицит влаги в почве к моменту уборки составил 45.3 мм. Снижения урожайности не прогнозируется: коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$ на протяжении всего вегетационного периода.

2.3. Участок III – Камбисоли CMdy

Для участка III (Камбисоли) расчет показал 14 поливов с постоянной нормой 32 мм нетто (35.6 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 2 июля в связи с начальным истощением почвенной влаги 56% TAW. Наименьший запас доступной влаги среди трех участков обуславливает наиболее высокую частоту поливов: интервалы между поливами составляют от 5 до 20 суток, наименьшие – в среднюю фазу при максимальных значениях E_{Ts} . Суммарная оросительная норма нетто составила 448.0 мм, брутто – 497.8 мм.

Таблица 6. Режим орошения кукурузы – участок I

Table 6. Maize irrigation regime – plot I

Дата / Date	Фаза / Phase	K_s	E_{Ta} , %	Истощ., % / Exhaust., %	Нетто, мм / Net, mm	Брутто, мм / Gross, mm	Расход, л/с/га / Consumption, l/s/ha
1 июля / July, 1	Нач. / Initial	1.00	100	57	38.0	42.2	4.89
28 июля / July, 28	Разв. / Develop.	1.00	100	55	38.0	42.2	0.18
10 авг. / Aug., 10	Разв. / Develop.	1.00	100	57	38.0	42.2	0.38
20 авг. / Aug., 20	Сред. / Middle	1.00	100	58	38.0	42.2	0.49
29 авг. / Aug., 29	Сред. / Middle	1.00	100	57	38.0	42.2	0.54
8 сент. / Sept., 8	Сред. / Middle	1.00	100	56	38.0	42.2	0.49
19 сент. / Sept., 19	Сред. / Middle	1.00	100	59	38.0	42.2	0.44
30 сент. / Sept., 30	Поздн. / Late	1.00	100	61	38.0	42.2	0.44
Нетто: 304.0 мм Брутто: 337.8 мм Потери: 6.3 мм Эфф. осадки: 143.2 мм КПД техники полива: 90% Эфф. графика орошения: 97.9% Net: 304.0 mm Gross: 337.8 mm Loss: 6.3 mm Eff. precipitation: 143.2 mm Efficiency of watering technique: 90% Eff. irrigation schedule: 97.9%							

Таблица 7. Режим орошения кукурузы – участок II

Table 7. Maize irrigation regime – plot II

Дата / Date	Фаза / Phase	Ks	ETa, %	Истощ., % / Exhaust., %	Нетто, мм / Net, mm	Брутто, мм / Gross, mm	Расход, л/с/га / Consumption, l/s/ha
3 июля / July, 3	Нач. / Initial	1.00	100	55	35.0	38.9	1.50
29 июля / July, 29	Разв. / Develop.	1.00	100	57	35.0	38.9	0.17
10 авг. / Aug., 10	Разв. / Develop.	1.00	100	59	35.0	38.9	0.38
18 авг. / Aug., 18	Разв. / Develop.	1.00	100	58	35.0	38.9	0.56
25 авг. / Aug., 25	Сред. / Middle	1.00	100	59	35.0	38.9	0.64
1 сент. / Sep., 1	Сред. / Middle	1.00	100	62	35.0	38.9	0.64
8 сент. / Sep., 8	Сред. / Middle	1.00	100	62	35.0	38.9	0.64
14 сент. / Sep., 14	Сред. / Middle	1.00	100	56	35.0	38.9	0.75
21 сент. / Sep., 21	Сред. / Middle	1.00	100	57	35.0	38.9	0.64
29 сент. / Sep., 29	Поздн. / Late	1.00	100	62	35.0	38.9	0.56
9 окт. / Oct., 9	Поздн. / Late	1.00	100	68	35.0	38.9	0.45
Нетто: 385.0 мм Брутто: 427.8 мм Потери: 1.2 мм Эфф. осадки: 143.2 мм КПД техники полива: 90% Эфф. графика орошения: 99.7% <i>Net: 385.0 mm Gross: 427.8 mm Loss: 1.2 mm Eff. Rainfall: 143.2 mm </i> <i>Efficiency of irrigation technique: 90% Eff. irrigation schedule: 99.7%</i>							

Таблица 8. Режим орошения кукурузы – участок III

Table 8. Maize irrigation regime – plot III

Дата / Date	Фаза / Phase	Ks	ETa, %	Истощ., % / Exhaust., %	Нетто, мм / Net, mm	Брутто, мм / Gross, mm	Расход, л/с/га / Consumption, l/s/ha
2 июля / July, 2	Нач. / Initial	1.00	100	56	32.0	35.6	2.06
22 июля / July, 22	Разв. / Develop.	1.00	100	55	32.0	35.6	0.21
1 авг. / Aug., 1	Разв. / Develop.	1.00	100	57	32.0	35.6	0.41
10 авг. / Aug., 10	Разв. / Develop.	1.00	100	62	32.0	35.6	0.46
16 авг. / Aug., 16	Разв. / Develop.	1.00	100	58	32.0	35.6	0.69
21 авг. / Aug., 21	Сред. / Middle	1.00	100	55	32.0	35.6	0.82
28 авг. / Aug., 28	Сред. / Middle	1.00	100	65	32.0	35.6	0.59
2 сент. / Sept., 2	Сред. / Middle	1.00	100	58	32.0	35.6	0.82
8 сент. / Sept., 8	Сред. / Middle	1.00	100	61	32.0	35.6	0.69
14 сент. / Sept., 14	Сред. / Middle	1.00	100	60	32.0	35.6	0.69
20 сент. / Sept. 20	Сред. / Middle	1.00	100	60	32.0	35.6	0.69
26 сент. / Sept. 26	Сред. / Middle	1.00	100	59	32.0	35.6	0.69
2 окт. / Oct., 2	Поздн. / Middle	1.00	100	62	32.0	35.6	0.69
11 окт. / Oct., 11	Поздн. / Middle	1.00	100	68	32.0	35.6	0.46
Нетто: 448.0 мм Брутто: 497.8 мм Потери: 64.6 мм Эфф. осадки: 107.2 мм КПД техники полива: 90% Эфф. графика орошения: 85.6% <i>Net: 448.0 mm Gross: 497.8 mm Loss: 64.6 mm Eff. Precipitation: 107.2 mm </i> <i>Efficiency of irrigation technique: 90% Eff. irrigation schedule: 85.6%</i>							

Потери при орошении составили 64.6 мм, что обусловлено превышением интенсивности подачи воды над скоростью впитывания почвы, приводящим к потерям на глубокий дренаж ниже корнеобитаемого слоя. Фактические эффективные осадки составили 107.2 мм при суммарных осадках 143.2 мм; потери осадков на поверхностный сток – 36.0 мм. Эффективность графика орошения составила 85.6% – наименьшее значение среди трех участков, что отражает наибольшее относительные потери воды на данном типе почвы. Дефицит влаги в почве к моменту уборки составил 17.5 мм. Снижения урожайности

не прогнозируется: коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$ на протяжении всего вегетационного периода.

3. Сравнительный анализ

Идентичность водопотребления ET_c (434.8 мм) и теоретической потребности по CWR (312.0 мм) для всех трех участков подтверждает фундаментальное свойство модели CROPWAT: тип почвы не влияет на расчет водопотребления культуры – только на формирование графика поливов через параметры TAW, фильтрации и глубины корней.

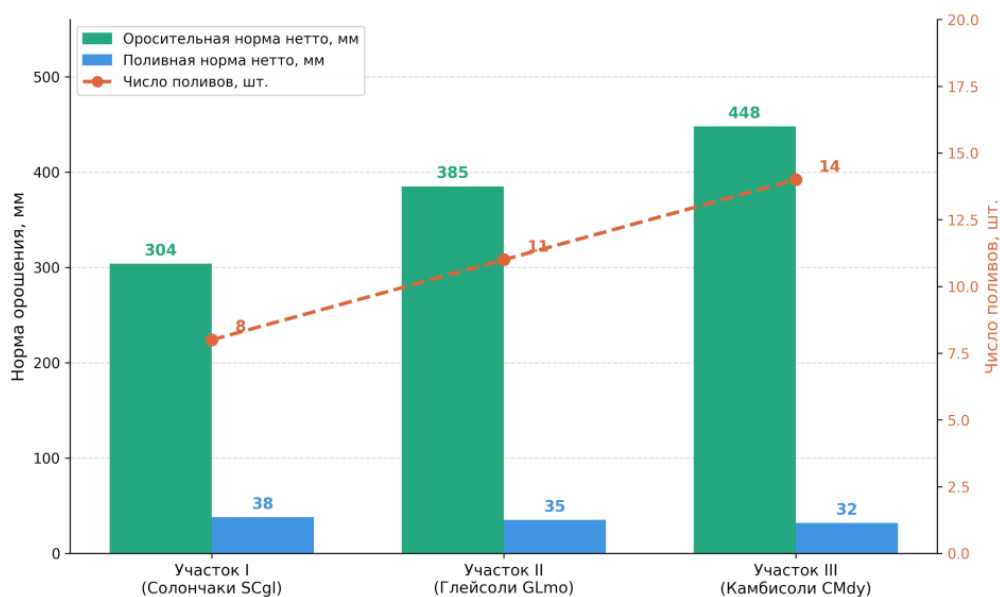


Рис. Оросительная норма нетто, мм, поливная норма нетто, мм, и число поливов, шт., для трех типов почв агроклиматического региона Имбо Республики Бурунди

Fig. Net irrigation rate (mm), net watering rate (mm) and number of waterings (pcs) for three soil types of the Imbo agro-climatic region of the Republic of Burundi

Различия в оросительных нормах грунто между участками (от 337.8 мм для участка I до 497.8 мм для участка III) определяются в данной методике главным образом величиной TAW. Участок III (Камбисоли) демонстрирует наибольшую грунто-норму вследствие низкого TAW (80 мм/м), что приводит к малому запасу доступной влаги (48 мм), и как следствие – к высокой частоте поливов и значительным суммарным потерям (64.6 мм). Участок II (Глейсоли) характеризуется наиболее высокой эффективностью графика орошения (99.7%) благодаря минимальным инфильтрационным потерям при высоком TAW (120 мм/м). Следует отметить, что оросительная норма грунто в реальных условиях определяется также техникой полива и уклонами поверхности поля, которые в модели CROP-WAT не учитываются.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения модели CROP-WAT 8.0 для дифференцированного расчета режима орошения при различных почвенных условиях. Вместе с тем модель не учитывает эффект капиллярного подпитывания из грунтовых вод, что в условиях мелкого их залегания на участке I (Солончаки) может приводить к завышению расчетных оросительных норм. Существенное влияние TAW и глубины корнеобитаемого слоя на формируемый режим орошения обосновывает необходимость детального почвенного обследования при проектировании ирригационных систем в агроклиматическом районе Имбо.

4. Практические рекомендации

На основе проведенных исследований сформулированы следующие практические рекомендации по оптимизации режима орошения кукурузы в условиях агроклиматического района Имбо.

1. Для участков с почвами типа Солончаки (участок I): применение режима 8 поливов с нормой 38 мм нетто обеспечивает эффективность графика орошения 97.9% и полное удовлетворение водных потребностей без водного стресса. Рекомендуется использование дождевания или капельного орошения для равномерного распределения поливной нормы; необходим регулярный контроль солеобменных процессов. При данной оросительной норме целесообразно рассмотреть переход на более частые поливы с меньшей поливной нормой, что позволит предотвратить подъем уровня соленых грунтовых вод.

2. Для участков с почвами типа Глейсоли (участок II): режим 11 поливов с нормой 35 мм нетто обеспечивает эффективность графика орошения 99.7%. Рекомендуется применение бороздкового орошения или дождевания с малой интенсивностью подачи воды для предотвращения поверхностного стока при поливе, что особенно актуально при относительно больших уклонах поверхности поля на транслювиальной фации.

3. Для участков с почвами типа Камбисоли (участок III): режим 14 поливов с нормой 32 мм нетто является вынужденным – при низком TAW (80 мм/м) и глубине корнеобитаемого

слоя 60 см более редкие поливы невозможны без возникновения водного стресса культуры. При выборе способа орошения и проектировании оросительной сети необходимо принять меры по минимизации потерь воды (64.6 мм) на испарение, поверхностный и подземный сток.

4. Сроки посева: планирование вегетационного периода с 1 июля по 28 октября обеспечивает совпадение максимального водопотребления (средняя фаза, август-сентябрь) с наиболее жарким периодом при надежном обеспечении орошением.

5. Мониторинг агро- и метеопараметров, влажности почвы: установка датчиков влажности на глубине 20-40 см позволит корректировать расчетный режим орошения с учетом фактических условий увлажнения.

Выводы

Расчет потребности в воде кукурузы и режима орошения методом FAO CROPWAT 8.0 выполнен для трех расчетных участков с различными типами почв (Солончаки, Глейсоли, Камбисоли) в агроклиматическом районе Имбо Республики Бурунди.

1. Суммарное водопотребление кукурузы ET_c за вегетационный период (01.07-28.10, 120 сут.) составило 434.8 мм; эффективные осадки – 127.2 мм (29.2%); теоретическая потребность в орошении (потребность культуры в воде, CWR) – 312.0 мм. Данные значения одинаковы для всех трех участков и определяются климатическими данными и параметрами культуры.

2. Режимы орошения существенно дифференцированы по типам почв:

участок I (Солончаки, продуктивные влагозапасы 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 (60 см), 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. Полученные результаты подтверждают необходимость дифференцированного подхода к проектированию систем орошения в агроклиматическом районе Имбо с учетом гидрофизических свойств конкретных типов почв и контроля метеопараметров. Методология FAO CROPWAT 8.0 обеспечивает надежный расчетный инструмент при условии корректной параметризации почвенных характеристик, однако имеет ряд ограничений: не учитывается водообмен между корнеобитаемым слоем и подстилающими горизонтами, что исключает возможность учета капиллярного подпитывания при неглубоком залегании грунтовых вод; расчет сроков и норм поливов выполняется по ретроспективным климатическим данным без учета прогноза осадков.

Список использованных источников

1. Gilbert N., Ivanovich S.A. Maize cropping system among small farmers in the agroecological zone in central Burundi and its advantages // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2021. № 174. С. 70-78
2. FAO. Analyse des incitations par les prix pour le maïs au Burundi, par Ndikumana R. et al. Série de notes techniques, SAPAA. Rome: FAO, 2016
3. Manasa P., Maitra S., Reddy M.D. Effect of Summer Maize-Legume ICS on Growth, Productivity and Competitive Ability of Crops // Int J Manage Technol Engg. 2018. Vol. 8(12). Pp. 2871-2875
4. George B., Shende S., Raghuwanshi N. Development and testing of an irrigation scheduling model // Agricultural Water Management. 2000. Vol. 46 (2). Pp. 121-136
5. Bhat S.A., Pandit B.A., Khan J.N. et al. Water Requirements and Irrigation Scheduling of Maize Crop using CROPWAT Model // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2017. Vol. 6 (11). Pp. 1-9.
6. Mondo J.M., Chuma G.B., Matiti H.M. et al. Crop calendar optimization for climate change adaptation in yam farming in South-Kivu, eastern DR Congo // PLoS ONE. 2024. Vol. 19 (9). e0309775

References

1. Gilbert N., Ivanovich S.A. Maize cropping system among small farmers in the agroecological zone in central Burundi and its advantages // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2021. № 174. С. 70-78.
2. FAO. Analyse des incitations par les prix pour le maïs au Burundi, par Ndikumana R. et al. Série de notes techniques, SAPAA. Rome: FAO, 2016.
3. Manasa P., Maitra S., Reddy M.D. Effect of Summer Maize-Legume ICS on Growth, Productivity and Competitive Ability of Crops // Int J Manage Technol Engg. 2018. Vol. 8(12). P. 2871-2875.
4. George B., Shende S., Raghuwanshi N. Development and testing of an irrigation scheduling model // Agricultural Water Management. 2000. Vol. 46(2). P. 121-136.
5. Bhat S.A., Pandit B.A., Khan J.N. et al. Water Requirements and Irrigation Scheduling of Maize Crop using CROPWAT Model // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2017. Vol. 6(11). P. 1-9.
6. Mondo J.M., Chuma G.B., Matiti H.M. et al. Crop calendar optimization for climate change adaptation in yam farming in South-Kivu, eastern DR Congo // PLoS ONE. – 2024. Vol. 19(9). – e0309775.

7. FAO. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper. Rome: FAO, 1998. № 56. 300 p.

8. FAO. CROPWAT 8.0 Software. Food and Agriculture Organization, Land and Water Division. Rome: FAO, 2009. URL: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

9. 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

10. Шабанов В.В., Нийонзима Н. Возможное изменение климата и сельское хозяйство Республики Бурунди. Деп. в ВИНТИ. от 20 июля 2012 г. № 313-B2012. 64 с.

11. Шабанов В.В., Нийонзима Н. Оценка изменения факторов внешней среды в бассейне реки Русизи на территории Республики Бурунди // Природообустройство. 2012. № 3. С. 30-35

12. Костяков А.Н. Основы мелиорации. М.: Сельхозиздат, 1960.

13. FAO. Irrigation in Africa in Figures. AQUASTAT Survey-2005. FAO Water Reports 29. Rome: FAO, 2005. 74 p.

14. Megerle H.E., Niragira S. The Challenge of Food Security and the Water-Energy-Food Nexus: Burundi Case Study // World Review of Nutrition and Dietetics. Karger AG, 2020. Vol. 121. Pp. 183-192

15. Нийонзима Н. Биоклиматическое обоснование необходимости орошения и осушения земель бассейна реки Русизи (Республика Бурунди): Дис. ... канд. техн. наук. М., 2013

16. Gabr M.E.S. Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt // Modeling Earth Systems and Environment. 2022. Vol. 8 (3). Pp. 3127-3142

17. Yetik A.K., Şen B. Evaluation of the impacts of climate change on irrigation requirements of maize by CROPWAT Model // Gesunde Pflanzen. 2023. Vol. 75 (4). Pp. 1297-1305

18. Roja M., Deepthi C., Devender Reddy M. Estimation of crop water requirement of maize crop using FAO CROPWAT 8.0 model // Indian J Pure Appl Biosci. 2020. Vol. 8. Pp. 222-228

7. FAO. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.

8. FAO. CROPWAT 8.0 Software. Food and Agriculture Organization, Land and Water Division. – Rome: FAO, 2009. URL: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

9. Icitetse I., Maksimov S.A. Current state and prospects for the development of irrigated agriculture in the Republic of Burundi. 2025. – № 5. P. 39-46. // Prirodoobustrojstvo. 2025. – № 5. P. 39-46. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-39-46.

10. Shabanov V.V., Niyonzima N. Possible climate change and agriculture in the Republic of Burundi. Dep. in VINITI. No 313-B2012 of 20.07.2012. – 64 p..

11. Shabanov V.V., Niyonzima N. Assessment of changes in the factors of the external environment in the basin of the Rusizi River in the territory of the Republic of Burundi // Prirodoobustrojstvo. 2012. № 3. P. 30-35.

12. Kostyakov A.N. Foundations of land reclamation. M.: Selkhozizdat, 1960.

13. FAO. Irrigation in Africa in Figures. AQUASTAT Survey – 2005. FAO Water Reports 29. – Rome: FAO, 2005. 74 p.

14. Megerle H.E., Niragira S. The Challenge of Food Security and the Water-Energy-Food Nexus: Burundi Case Study // World Review of Nutrition and Dietetics. – Karger AG, 2020. Vol. 121. P. 183-192.

15. Niyonzima N. Bioclimatic substantiation of the need for irrigation and drainage of the lands of the Rusizi river basin (Republic of Burundi): diss. ... candidate of technical sciences. Moscow, 2013.

16. Gabr M.E.S. Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt // Modeling Earth Systems and Environment. 2022. – Vol. 8(3). – P. 3127-3142.

17. Yetik A.K., Şen B. Evaluation of the impacts of climate change on irrigation requirements of maize by CROPWAT Model // Gesunde Pflanzen. – 2023. – Vol. 75(4). P. 1297-1305.

18. Roja M., Deepthi C., Devender Reddy M. Estimation of crop water requirement of maize crop using FAO CROPWAT 8.0 model // Indian J Pure Appl Biosci. 2020. Vol. 8. P. 222-228.

Информация об авторе

Ичитегетсе Инносент, аспирант; кафедра сельскохозяйственных мелиораций РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; SPIN-код: 3352-4984; Author ID: 1273590; ORCID: 0009-0004-5052-4803; citegetseinnocent@gmail.com

Information about the author

Icitetse Innocent, post graduate student; department of agricultural Land reclamation, Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, SPIN-code: 3352-4984, Author ID: 1273590, ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 08.04.2026

Поступила после рецензирования / Received 04.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 16.06.2026