

Стратегии планирования режима орошения хлопка в условиях дефицита воды в Ферганской Долине, Центральная Азия

Л.С.Перейра а,^{*}, П.Паредас а, Е.Д. Чолпанкулов б, О.П. Инченкова в, П.Р. Теодоро а, М.Г.Хорст с

а Сельскохозяйственный научно-технический центр, Институт агрономии, Технический университет Лиссабона, Тапада да Аджуда, Лиссабон, Португалия.

б Научно-информационный центр межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии (НИЦ МКВК), В.11, Карасу-4, Ташкент 700187, Узбекистан

с Центрально-Азиатский Научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), В.11, Карасу-4, Ташкент 700187, Узбекистан

Резюме

Из-за аридности климата и опустынивания центрально-азиатские страны сталкиваются с высоким дефицитом воды, однако зачастую для основных орошаемых культур характерны избыточные поливы. Эти переполивы являются причиной обострения проблемы нехватки воды. Поэтому необходимо усовершенствованное водосберегающее орошение, главным образом за счет усовершенствования режимов орошения. Для этого, после предварительной калибровки и проверки для хлопка в Ферганской области, была опробована модель имитации режима орошения ISAREG для выбора усовершенствованных режимов орошения.

Результаты показывают, что при нынешнем режиме орошения значительная часть поливной воды, в среднем 20%, просачивается вглубь, ниже корневой зоны. Было проанализировано несколько стратегий орошения, в том числе орошение в полном объеме и различные уровни дефицитного орошения. Анализ выполнен за тот трехлетний период, когда проводились эксперименты с целью калибровки и проверки модели, а многолетний период в 33 года использовался для расчета вероятного водопотребления. Первый период относится к влажному периоду, в то время как второй период включает в себя разнообразные климатические условия, определяющие водопотребление, что позволяет анализировать альтернативные режимы для условий средней, высокой и очень высокой **эталонной эвапотранспирации**. Результаты показали значение вклада грунтовых вод, главным образом при дефицитном орошении. Анализируя несколько стратегий дефицитного орошения через их потенциал экономии воды, относительные потери урожая, продуктивность воды и экономическую продуктивность воды, можно сделать вывод, что можно принять относительно умеренные дефициты. Наоборот, принятие режима с большим дефицитом воды, что способствует большей экономии воды, может привести к потерям урожая, что может быть экономически не приемлемо.

1. Введение

Именно в Узбекистане хлопок является самой важной культурой в орошаемой зоне и в производстве (FASUSDA, 2002; FAO, 2004). В Центральной Азии при поверхностном способе полива хлопка часто используется чрезмерное количество воды (Horst et al., 2005, 2007). Использование воды, кроме того, затруднено из-за плохого водоснабжения и распределения воды, что вызывает серьезные проблемы истощения водных ресурсов, заболачивание и засоление. Поэтому исследование сосредоточено на усовершенствовании управления водой, как на уровне фермерского хозяйства, так и в масштабе системы (Pereira et al., 2005). В отношении орошения хлопка исследование показывает, что для усовершенствования поверхностного способа орошения существуют различные пути (Horst et al., 2005, 2007) и что альтернативные стратегии планирования режима орошения также необходимы. Для региона с этой целью была откалибрована и протестирована имитирующая режим орошения модель ISAREG (Cholpankulov et al., 2008). Основываясь на результатах исследования, основное внимание в данной статье уделяется поиску

улучшенных стратегий планирования орошения хлопка, применимых в Ферганской Долине.

Подходящий режим орошения играет важную роль в деле водосбережения, более высоких показателях орошения и контроле за просачиванием в результате излишков воды при поливе (Smith et al., 1996; Pereira et al., 2002). Некоторые исследования свидетельствуют о том, что урожай хлопка уменьшается из-за избыточного полива (Jackson and Tilt, 1968; Grimes et al., 1969). Однако чаще опубликованные исследования посвящены влиянию дефицита воды на рост и урожай хлопка (Grimes and Yamada, 1982; Gerik et al., 1996; Pettigrew, 2004a, 2004b; Karam et al., 2006; Falkenberg et al., 2007; DeTar, 2008). Причины водного стресса хорошо известны (Bruce and Shipp, 1962; Turner et al., 1986; Pettigrew, 2004b), а связи между методами и режимом орошения дают возможность также понять пути улучшения использования воды и продуктивности (Dalton et al., 2001; Howell et al., 2004; Gibb et al., 2004; Bhattarai et al., 2006; Dagdelen et al., 2006). Разработано несколько зависимостей «вода-урожай» (Shreder et al., 1977; Doorenbos and Kassam, 1979; Ertek and Kanber, 2003; Dagdelen et al., 2006). Эти исследования совершенно четко говорят о том, что период от цветения до формирования урожая является критическим в отношении дефицита воды, а период от начала всходов до цветения – чувствителен для избытка воды и может вызвать усиленный рост растений. Для региона были установлены поливные нормы в помощь фермерам, однако следование этим рекомендациям со стороны фермеров все еще далеко от ожидаемых результатов (Shreder et al., 1977; Laktaev, 1978; Domullodjanov, 1983). Компьютерные модели являются подходящим средством для разработки и оценки альтернативных стратегий орошения, и огромное число таких моделей доступно для расчета водного баланса почвы и генерирования усовершенствованных режимов орошения. Примером является модель ISAREG (Teixeira and Pereira, 1992; Pereira et al., 2003), которая успешно использовалась для исследования вариантов альтернативных режимов орошения для различных культур и регионов (Cancela et al., 2006; Porova and Pereira, 2008), включая Центральную Азию, где модель успешно прошла проверку для хлопка (Cholpankulov et al., 2008), и где была использована версия ГИС (Fortes et al., 2005). Основная цель данного исследования состоит в использовании ISAREG для оценки альтернативных режимов орошения хлопка с целью эффективного использования воды и водосбережения.

2. Материалы и методы

2.1. Моделирование

Модель ISAREG (Pereira et al., 2003) была выбрана для имитации и оценки альтернативных режимов орошения хлопка после ее калибровки и проверки (Cholpankulov et al., 2008). Для калибровки и проверки на достоверность модели ISAREG в условиях Ферганской Долины использовались экспериментальные данные. Модель позволяет определить и оценить различные варианты режимов орошения, как описано в предыдущих публикациях (Cancela et al., 2006; Porova and Pereira, 2008). В зависимости от наличия метеорологических данных, возможен расчет за различные временные интервалы (ежедневные, декадные, месячные). Модель рассчитывает водный баланс многослойной почвы и позволяет определить влияние засоления (Pereira et al., 2007) и оценить подпитку грунтовыми водами (GC), используя параметрическую функцию помимо известных характеристик почвы, относящихся к капиллярному подъему, глубине залегания грунтовых вод, листовому индексу культуры (LAI) и эвапотранспирации культуры за различные даты на протяжении цикла формирования урожая (Liu et al., 2006). В модели ISAREG для расчета эвапотранспирации культуры (ETa) используется методология, предложенная Allen et al. (1998). Потенциальная эвапотранспирация культуры ETc (мм) равна:

$$ET_c = K_c ETo \quad (1)$$

Где, ETo (мм) - эталонная эвапотранспирация, K_c - коэффициент культуры. Действительная эвапотранспирация культуры (ET_a) меньше ET_c , если истощение почвенной влаги превышает долю истощения при отсутствии стресса (p). ET_a рассчитывается по уравнению баланса почвенной влаги как функция доступной почвенной влаги в корневой зоне, как описано в (Teixeira и Pereira, 1992), а предельное уменьшение равно контролируемому допустимому истощению (MAD). Если водный стресс не допустим, $MAD \leq p$; при дефицитном орошении - $MAD > p$. Коэффициент культуры (K_c) и доля истощения при отсутствии стресса (p) были получены путем калибрования (Eholpankulov et al., 2008).

Для оценки влияния водного стресса на урожай культуры в модели используется метод, предложенный Stewart et al. (1977) и Doorenbos and Kassam (1979), по которому относительные потери урожая рассчитываются по относительному дефициту эвапотранспирации (RYL) и водному фактору реакции урожая (K_y), в виде следующего уравнения:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad (2)$$

Где, ET_a и ET_c – соответственно действительная и потенциальная эвапотранспирация культуры (мм) за сезон, Y_a - урожай (кг/га) при $ET = ET_a$, а Y_m – потенциально достижимый урожай (кг/га) хорошо приспособленного сорта культуры к естественным, не нарушенным человеком, условиям при $ET = ET_c$. Величину максимального или потенциального урожая культуры (Y_m) можно получить из полевых наблюдений (Popova et al., 2006) или рассчитать, используя приближенный метод, предложенный Doorenbos и Kassam (1979), когда не имеется местных экспериментальных данных. Эти авторы определяют Y_m как урожай высокопродуктивного сорта культуры, хорошо адаптированного к местным условиям произрастания, не имеющих ограничений для выращивания урожая с точки зрения воды, питательных веществ, вредителей и болезней; они оценивают его как функцию нескольких климатических факторов, таких как температура, солнечная радиация и общая продолжительность вегетационного сезона. В данном случае величина Y_m оценивалась по этой же методике, а данные наблюдений были использованы в помощь расчетам. Фактор реакции урожая K_y был заимствован из литературных источников по Средней Азии (Shreder et al., 1977) и из экспериментальных данных по бороздковому поливу (Horst et al., 2007).

Параметрические функции, обычно используемые для расчета подпитки грунтовыми водами (GC) и глубокой фильтрации (DP), были определены во время калибровки модели и приводятся у Чолпанкулова (Cholpankulov et al., 2008). Входные данные для модели включают:

- ♦ Метеорологические данные, относящиеся к осадкам P (мм) и эталонной эвапотранспирации ETo (мм), или данные для расчета ETo по методу ФАО Пенман-Монтейт, включая другие расчетные методы при отсутствии климатических данных (Allen et al., 1998).
- ♦ Данные по культуре: даты начала и конца периодов развития культуры, коэффициент урожая (K_c); глубина корневой зоны Zr (м); доля истощения почвенной влаги при отсутствии стресса (p); и сезонные факторы реакции урожая на воду (K_y).

- ♦ Почвенные данные по слоям: для каждого слоя, толщина слоя d (м); содержание почвенной влаги при наименьшей влагоемкости uFC (м³/м³), и при влажности завядания uWP (м³/м³), или суммарная влагоемкость, TAW (мм); для параметризации уравнений расчета GC и DP используется дополнительный файл; данные о доступной почвенной влаге при посеве (ASW) вводятся пользователем.

ASW (мм) при посеве определяется либо по данным наблюдений, либо рассчитывается. Ее можно рассчитать по уравнению водного баланса для открытой почвы, начиная с даты, когда величина ASW известна, например, в период дождей, когда можно принять, что $ASW = 100\% TAW$. Далее расчет по модели ведется для погодных условий этого года до даты посева. Рассчитанная величина ASW на эту дату принимается как рассчитанная величина на момент посева. В данном случае ASW рассчитывалась за каждый год, включая период заморозков на почве. Модель дает возможность рассчитать по нескольким вариантам оросительные нормы и даты полива и принять ограничения по максимальной водообеспеченности во время специфических временных периодов или для фаз вегетационного периода. Оросительные нормы-нетто (D) могут различаться или могут быть постоянными (фиксированными). В данном исследовании была принята постоянная норма орошения $D = 70$ мм по результатам полевых исследований Horst et al. (2005, 2007), касающихся усовершенствования полива напуском по бороздам. Даты полива определялись по выбранным *критическим* значениям содержания влаги в почве. Альтернативные стратегии управления приводятся в таблице 1:

- (а) орошение в полном объеме (FI), нацеленное на достижение максимального урожая, когда $MAD = p$, т.е. когда пороговое значение влагосодержания почвы является высоким, что равно средним влагозапасам почвы в корневой зоне при истощении равном p ; принято постоянное значение $D = 70$ мм;
- (б) дефицитное орошение (DI), когда $MAD > p$ в фазу роста культуры, когда дефицит воды практически не влияет на урожай. Пороговые значения - $uMAD = 0.75cp$ в период от появления всходов культуры до цветения и от созревания до уборки урожая, и $uMAD = cp$ для начала вегетации и ее середины (от цветения до созревания). Принято $D = 70$ мм. Для моделирования рассматриваются два варианта: один – по числу поливов, обусловленных минимизированием RYL (DI-RYL); другой – когда число поливов сокращается до 1, 2 или 3 (DI-1, 2 и 3) как показано в таблице 1.

Для всех режимов орошения, последний полив осуществляется как минимум за 20 дней до сбора урожая, так как качество хлопковолокна ухудшается, если его влагосодержание превышает 8% во время уборки урожая (Barker, 1982, 1996; Barker and Laird, 1993).

В данном исследовании использовались 2 разных подхода: в первом случае использовались ежедневные метеорологические данные (за 2001–2003 гг.), а во втором – декадные данные за период 1970–2003 гг. Характеристики культуры, использованные для моделирования, взяты по данным наблюдений за 2003 год.

Результаты моделирования оценивались при помощи сравнения рассчитанной продуктивности воды WP (кг/м³ или кг/мм), и хозяйственной продуктивности воды EWP (см³). WP определяется (Pereira, 2007) из отношения действительной величины урожая, Y_a (кг) к общему объему использованной воды, TWU (м³):

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} \quad (3)$$

или, детализируя TWU ,

$$WP = \frac{Y_a}{P + GC + \Delta SW + I} \quad (4)$$

Где, P – вегетационные осадки (мм), GC - подпитка грунтовыми водами за вегетацию (мм), ΔSW - изменение содержания влаги в почве между посевом и сбором урожая (мм), а I – сезонная величина орошения брутто (мм). В этой редакции WP выражено в кг/мм и урожай относится к единице поверхности. I получено из D при использовании эффективности, наблюдаемой Хорстом (Horst et al. (2005, 2007)). EWP определяется при замене числителя в выражениях (3) и (4) величиной полученного урожая в денежном выражении - Value (Ya), таким образом:

$$EWP = \frac{\text{Value}(Y_a)}{TWU} \quad (5)$$

2.2 Экспериментальный участок и данные

Экспериментальная ферма «Азизбек-1» находится в Ферганской Долине около города Ферганы в Узбекистане. Метеорологическая станция находится в том же городе (40.778 СШ, 71.098 ВД, на высоте 439м). Среднемесячные метеорологические данные представлены в таблице 2. Долина граничит с Ферганским хребтом на востоке, с Алайским и Туркестанским хребтами - на юге и с Кураминским и Чаткальским хребтами - на северо-западе и севере. Ферганская Долина дренируется рекой Сырдарьей и огромным количеством горных водотоков, которые питают горные ледники. Экспериментальная область расположена к югу от реки Сырдарья.

Таблица 1 – Список стратегий режимов орошения

Обозначение	Оросительная стратегия	MAD	D	Число поливов
FI	Полное орошение	MAD = p	D = 70мм	Не ограничено
DI-RYL	Дефицитное орошение при минимальном RYL	MAD < p	D = 70мм	Не ограничено
DI-1	Дефицитное орошение	MAD < p	D = 70мм	На 1 меньше, чем FI
DI-2	Дефицитное орошение	MAD < p	D = 70мм	На 2 меньше, чем FI
DI-3	Дефицитное орошение	MAD < p	D = 70мм	На 3 меньше, чем FI

Таблица 2 – Среднеголетние данные по Ферганской метеорологической станции (1970-2003 гг.)

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Макс.температура (оС)	4,0	6,5	13,7	22,2	27,7	32,9	34,6	33,2	28,4	21,2	13,1	6,2
Мин.температура (оС)	-3,7	-1,7	4,0	10,6	14,5	18,3	20,1	18,2	13,3	7,	2,8	-1,5
Относительная влажность (%)	81	77	68	60	54	46	47	51	55	65	74	81
Скорость ветра (м/с)	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0
Продолжительность солнечной сияния	90	120	150	210	270	330	330	330	270	210	150	90

(час.)												
ЕТо (мм/сут)	1,4	1,7	2,5	3,7	4,5	5,5	5,7	5,4	4,7	3,4	2,2	1,5
Осадки (мм)	18,0	21,4	24,3	22,1	19,9	9,4	4,2	2,7	5,9	17,6	17,4	19,9

Таблица 3 – Даты наступления фаз вегетации культуры, откалиброванные коэффициенты культуры (Кс) и фактор истощения эвапотранспирации при отсутствии стресса (р), Ферганская Долина.

Параметр	Начало	Развитие	Середина сезона	Конец сезона
Продолжительность фазы (даты)				
2001 (калибровка)	13/04-17/05	18/05-17/07	18/07-31-08	01-09-10/10
2003 (проверка достоверности)	06/04-20/05	21/05-19/07	20/07-01/09	02/09-14/10
Коэф. культуры, Кс	0,30	0,30-1,20	1,20	0,65
Фактор истощения, р	0,6	0,6	0,6	0,6

Основные почвы на экспериментальном участке – суглинистые и тяжелосуглинистые. Гидравлические характеристики ненасыщенной почвы были определены при соответствующем обследовании с использованием лабораторных методов определения полного набора электрического сопротивления почвенной влаги. Средневзвешенные значения для почвенного слоя, глубиной в 1 м (принятого для моделирования) (Cholpankulov et al., 2008):

- ♦ Полевая влагоемкость, $u_{FC} = 0.31 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- ♦ Влажность завядания, $u_{WP} = 0.16 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- ♦ Суммарный запас доступной влаги, $TAW = 148 \text{ мм/м}$.

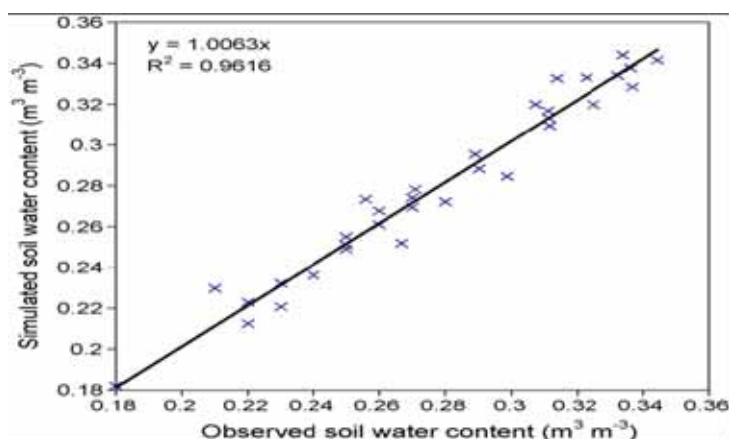


Рисунок 1 – Сравнение между наблюдаемыми данными содержания влаги в почве и полученными с помощью моделирования, при использовании данных за 2001 и 2003 годы.

На экспериментальном участке в период 2001-2003 гг. уровень грунтовых вод колебался между 1.10 и 2.60 м. Исходные наблюдения были использованы для калибровки и проверки на достоверность; параметры, использованные для расчета GC и DP предоставлены Чолпанкуловым (Cholpankulov et al., 2008). Коэффициенты культуры (Кс) и доля истощения при отсутствии стресса (р), установленные в процессе калибровки и проверки, представлены в таблице 3 (Cholpankulov et al., 2008). И значения Кс, и значения р лежат в пределах значений,

рекомендованных Алленом (Allen et al., 1998). Однако значения K_s в конце сезона выше, благодаря позднему поливу. Сравнение значений содержания воды в почве, полученных по модели и наблюдениям, при использовании параметров культуры (таблица 3) во время экспериментов, проводимых в 2001 и 2003 годах, показано на рисунке 1. Результаты сравнения свидетельствуют о хорошем совпадении между наблюдаемыми и рассчитанными значениями содержания влаги в почве.

Коэффициент реакции урожая $K_y = 1.11$ был получен из экспериментов по хлопку в Фергане (Horst et al., 2007). Это значение больше, чем рассчитанное по кривой, предложенной Шредером (Shreder et al., 1977) для региона, и рекомендуемое Доренбо и Кассамом (Doorenbos and Kassam, 1979), поскольку использовался новый, более продуктивный сорт (*Gossipium hirsutum* var. upland C-6524), который также более чувствителен к водному стрессу. Близкие высокие значения K_y приводятся в литературе (Yazar et al., 2002; Dagdelen et al., 2006; DeTar, 2008).

3. Результаты

3.1. Оросительные нормы нетто

Оросительные нормы нетто, NIR (мм), рассчитывались за многолетний период 1970-2003, с целью определения норм различной обеспеченности (средней – 50%, высокой – 75%, и очень высокой – 95%).

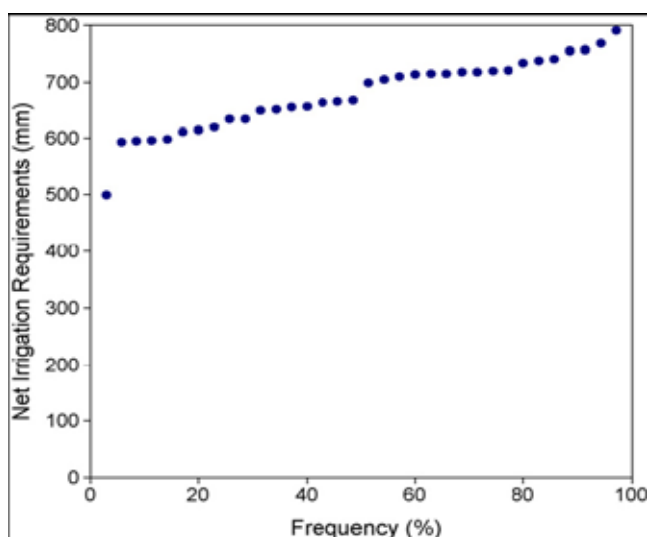


Рис. 2 – Плотность распределения оросительной нормы нетто (NIR) для хлопка, Ферганская Долина (1970-2003).

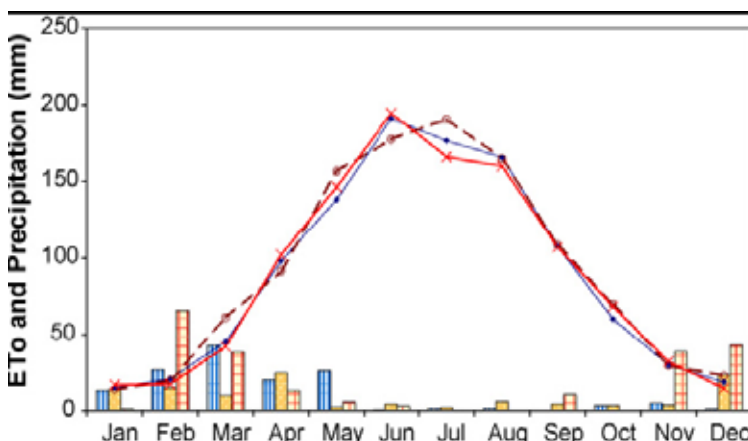


Рис. 3 – Среднемесячные осадки и суммарное испарение в стандартных условиях для условий средней, высокой и очень высокой эталонной эвапотранспирации

Моделирование было выполнено за весь многолетний период с использованием параметров культуры из таблицы 3, дат начала фаз вегетации за 2003 год и ASW на дату сева, рассчитанную по модели, как описано выше.

NIR за все годы представлены на рисунке 2. Принимая нормальное распределение для рассчитанных норм, были определены годы 50, 80 и 95 %-ной обеспеченности (1973, 1971 и 1984 гг. соответственно). Можно увидеть, что годы, за которые имеются суточные данные, соответствуют вероятности нормы орошения меньше 30%, а 2003 год является самым влажным за весь исследуемый период.

На рисунке 2 видно, что NIR для хлопка колеблется в относительно узком интервале (791-593 мм), исключая 2003 год, в котором NIR намного ниже (499 мм). Данные рисунка 3 показывают, что климатические условия 3-х выбранных уровней различаются, главным образом, за счет осадков, а ETo меняется незначительно. Результаты говорят также о том, что засушливые условия преобладают в период вегетации хлопка.

Основные составляющие водного баланса при расчете NIR (ASW при посеве, дождевые осадки за период, суммарное испарение за период, и оросительная норма нетто за период) приведены в таблицах 4 и 5 соответственно за 2001-2003 годы и для климатических условий, соответствующих средней, высокой и очень высокой эталонной эвапотранспирации.

3.2. Современные режимы орошения и их усовершенствование

Режимы орошения хлопка, применяемые в настоящее время в Ферганской Долине, моделировались с использованием суточных метеорологических данных для оценки современных условий орошения (таблица 6 и рисунок 4).

Результаты (таблица 6 и рисунок 4) показывают, что фермеры склонны поливать большими нормами (от 86 до 174 мм), что приводит к относительно высокому просачиванию воды и ненадлежащему использованию дождевых вод. Такая стратегия соответствует выбору доли истощения при отсутствии стресса $p = 0.45$, которая намного меньше оптимальной $p = 0.6$ (Horst et al., 2005, 2007). Фильтрация варьирует в пределах от 140 до 230 мм и в значительной степени превышает промывные нормы (5% величины полива). Умеренный водный стресс наблюдается ($ET_a < ET_c$) из-за того, что вода не всегда подается вовремя. Результаты указывают на то, что подпитка грунтовыми водами невелика, что связано с тем фактом, что глубокий дренаж эффективно контролирует уровень воды (Dukhovny et al., 2005).

Результаты показывают, что текущие режимы орошения не пригодны для того, чтобы справиться с преобладающими в регионе условиями нехватки воды, обозначенными как аридность и опустынивание, вследствие чего требуется более эффективное использование оросительной воды. Это подразумевает то, что даты поливов необходимо уточнять, а величину оросительной нормы контролировать, чтобы уменьшить как глубокую инфильтрацию, так и поверхностный сток, как показано в исследованиях по улучшению полива напуском по бороздам (Horst et al., 2007). К тому же необходимо повысить продуктивность воды; тем не менее, при экономии оросительной воды, допустимо лишь ограниченное снижение урожая, поскольку доходы фермеров в регионе невелики.

Таблица 6 – Моделирование режима орошения хлопка в 2001 и 2003 гг., при использовании фактических дат полива и величин оросительной нормы.

2001 г.		2003 г.	
Дата	Слой (мм)	Дата	Слой (мм)
8 апреля*	143	14 марта*	171
2 июня	127	15 июня	125
25 июня	174	6 июля	103
11 июля	123	23 июля	123
25 июля	111	8 августа	114
7 августа	86	24 августа	91
		10 сентября	93
Компоненты водного баланса		Значение (мм)	Значение (мм)
		2001 г.	2003 г.
Полив за вегетацию		764	820

ASW при посеве		140	125
ASW при сборе урожая		36	103
Осадки		45	172
Неиспользуемые осадки		-	50
Подпитка грунтовыми водами		94	29
Инфильтрация		230	140
ET _a		635	683
Etc		695	683
* Предпосевной полив			

Таблица 7 – Водный баланс при орошении достаточным количеством воды (FI), 2001-2003.

Даты полива

2001 г.	2002 г.	2003 г.	
06-06	Предпосевной*	28-06	
28-06	19-06	11-07	
11-07	05-07	22-07	
22-07	17-07	02-08	
05-08	28-07	16-08	
19-08	09-08	30-08	
05-09	22-08	19-0	
	12-09		
Компоненты водного баланса	Значение (мм)	Значение (мм)	Значение (мм)
	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Полив за вегетацию	490	560	490
ASW при посеве	140	120	126
ASW при сборе урожая	53	63	106
Осадки	45	84	172
Неиспользуемые осадки	-	-	50
Подпитка грунтовыми водами	72	63	51
ET _a	697	693	683
Etc	697	693	683
* Предпосевной полив = 70 мм			

3.2.1. Полное орошение

Для условий 2001-2003 гг. были разработаны усовершенствованные режимы орошения с целью водосбережения, борьбы с фильтрацией и одновременно максимально возможного увеличения урожая (таблица 7). Величина оросительной нормы составляла 70 мм (D - 70 мм), что соответствует ее величине для усовершенствованного бороздкового полива, согласно (Horst et al., 2005, 2007).

Дождевые осадки за вегетацию изменялись от 45 до 172 мм, а величина эвапотранспирации – от 683 до 697 мм. Величина ASW на момент сбора урожая достаточна и указывает на то, что сельхозкультура хорошо использует влагу почвы во время 20-дневного отсутствия поливов перед сбором урожая. Результаты также показывают, что ET_a = ET_c, указывая таким образом на то, что водный стресс отсутствует.

Сравнение FI с текущими режимами орошения в таблице 6 показывает, что поскольку величина нормы за каждый полив меньше, чем практикуется в настоящее время, число поливов больше, а сезонная оросительная норма меньше. Подпитка грунтовыми водами варьирует между 9 и 12% от общей потребности в орошении сельхозкультуры и меньше по величине, чем в таблице 6.

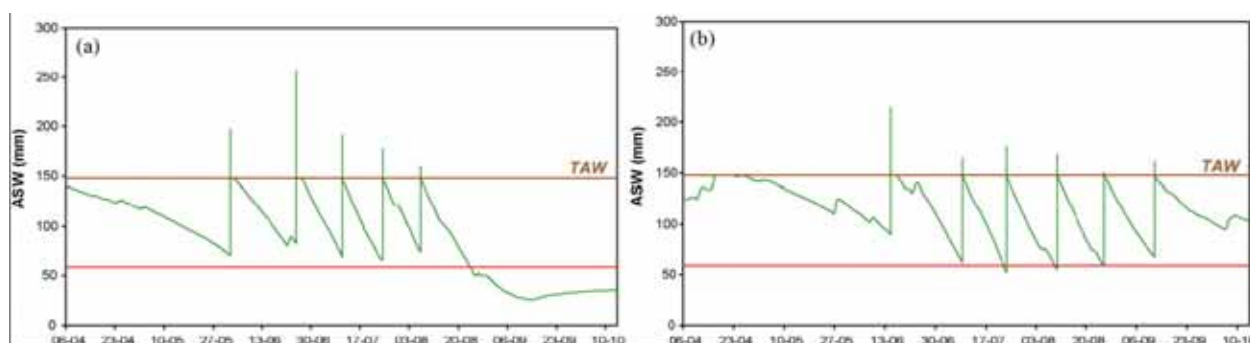


Рис. 4 – Сезонное колебание доступной почвенной влаги при современных режимах орошения хлопка в: (а) 2001 г.; и (б) 2003 г.

Табл. 8 Моделирование дефицитных режимов орошения хлопка, 2001-2003 гг.

Год	Стратегия орошения	Оросительная норма (мм)	ASW при посеве (мм)	ASW при уборке урожая (мм)	Подпитка грунтовыми водами (мм)	ET _a (мм)	RYL (%)
2001	DI-RYL	490	140	57	74	693	1
	DI-1	420		37	96	664	5
	DI-2	350		36	116	616	13
	DI-3	280		35	132	562	21
2002	DI-RYL	560 ^a	120	76	69	686	1
	DI-1	490 ^a		39	88	672	3
	DI-2	420 ^o		36	110	620	11
	DI-3	350 ^a		36	126	573	19
2003	DI-RYL	420	126	62	73	678	1
	DI-1	350		52	93	638	7
	DI-2	280		50	108	586	16
	DI-3	210		49	121	530	25

^aВключая предпосевной полив = 70 мм.

Величина ASW при сборе урожая меньше, чем полученная по модели для текущих режимов (таблица 6), что свидетельствует, таким образом, о лучшем использовании влагозапасов почвы и дождевых осадков.

Результаты говорят о том, что если выбраны правильная норма орошения и время полива, вегетационная норма может быть уменьшена, а глубокая фильтрация – контролируема, предотвращая, таким образом, подъем уровня грунтовых вод и связанное с ним засоление почвы.

3.2.2. Дефицитное орошение

Результаты моделирования режимов дефицитного орошения, представленных в таблице 1, обобщены в таблице 8. Результаты DI-RYL стратегии показывают, что хотя величина оросительной нормы за вегетацию меньше, чем величина водопотребления, соответствующая полному удовлетворению потребностей культуры, относительные потери урожая минимальны (RYL ≈ 1%). DI стратегии способны вложить в грунтовые воды, чем при полном орошении, который составляет 10-31% от суммарного водопотребления сельхозкультуры. Они также приводят к меньшему ASW на момент уборки урожая, и следовательно к лучшему использованию почвенной влаги и осадков. Однако, уменьшение числа поливов с целью водосбережения увеличивает RYL: 3-7% для DI-1, 11-16% для DI-2, и 19-25% для DI-3. Такая значительная экономия воды в результате сокращения количества поливов на 2 или 3, с экономической точки зрения сомнительна, если учитывать, что фермеры в регионе имеют низкие доходы.

Для более полного сравнения FI и DI стратегий, на рисунке 5 представлены результаты моделирования влагозапасов почвы в течение вегетационного периода. Они показывают, что осадки в весенний период и в 2001 и в 2003 гг. предотвращают стресс на ранних стадиях вегетации культуры, а дефицит воды оказывает воздействие лишь

на более поздней стадии, главным образом при DI, за счет сокращения количества поливов (рисунок 5с). Еще большее сокращение количества поливов приводит к водному стрессу в середине вегетации, оказывая более сильное влияние на урожай.

3.2.3. Продуктивность воды и водосбережение

Продуктивность воды и экономическая продуктивность воды (уравнения (3)-(5)) представлены в таблице 9 для всех усовершенствованных режимов орошения. Результаты моделирования урожая согласуются с измеренными во время полевых экспериментов (Horst et al, 2007). Однако, значения WP несколько больше, чем полученные в полевых условиях, поскольку в полевых исследованиях суммарная величина оросительной нормы была больше.

Табл. 9 - Моделирование оросительной нормы брутто для хлопка, общего количества использованной воды (TWU), урожая, продуктивности воды, стоимости урожая и экономической продуктивности воды усовершенствованных режимов орошения, 2001-2003 гг.							
Год	Стратегия орошения	Оросительная норма брутто (мм)	TWU (мм)	Урожай (кг/га)	WP (kgm ⁻³)	Стоимость Урожая (€/га)	EWP (€/m ³)
2001	FI	817	1021	3722	0.365	1720	0.168
	DI-RYL	815	1017	3699	0.363	1709	0.168
	DI-1	700	944	3527	0.374	1629	0.173
	DI-2	583	849	3242	0.382	1498	0.176
	DI-3	467	749	2922	0.390	1350	0.180
2002	FI	933	1138	3665	0.322	1693	0.149
	DI-RYL	930	1134	3624	0.320	1674	0.148
	DM	817	1070	3542	0.331	1636	0.153
	DI-2	700	978	3236	0.331	1495	0.153
	DI-3	583	873	2960	0.337	1367	0.156
2003	FI	817	1060	3625	0.342	1674	0.158
	DI-RYL	700	1009	3595	0.356	1661	0.165
	DI-1	583	922	3360	0.364	1552	0.168
	DI-2	467	822	3053	0.371	1410	0.172
	DI-3	350	720	2723	0.378	1258	0.175

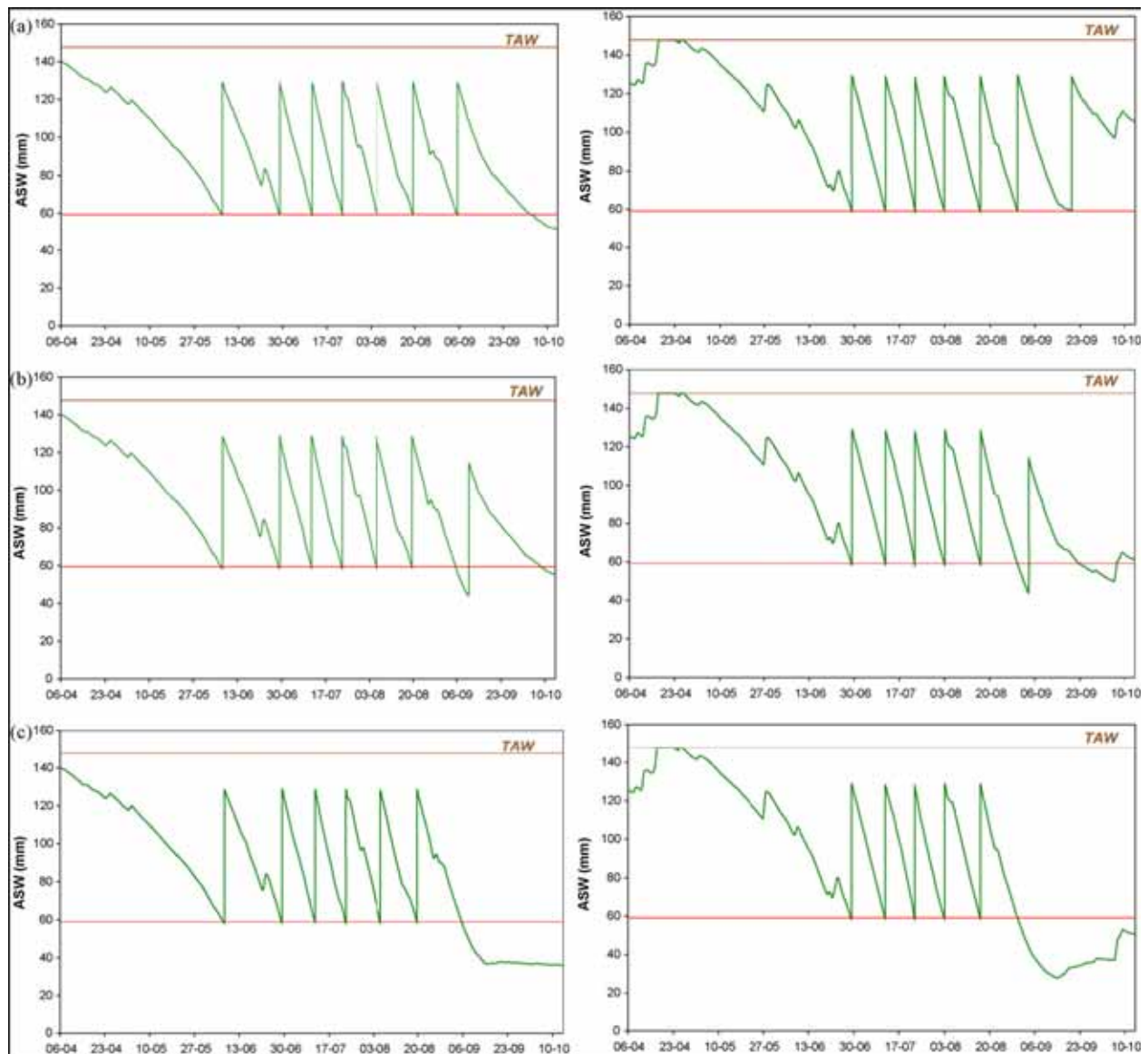


Рис. 5 – Изменение влагозапасов почвы (мм) в течение сезона для следующих режимов орошения хлопка: (а) FI, (б) DI-RYL, (с) DI-1; слева - для условий 2001 года, а справа – для 2003 года.

WP выше для DI стратегий, так как они соответствуют снижению оросительной норме брутто (таблица 9). Однако, суммарное увеличение невелико, поскольку из-за водного дефицита урожаи снижаются. EWP также умеренно увеличивается при дефицитном орошении; однако стоимость урожая сильно уменьшается при DI-2 и DI-3 (приблизительно для DI-2 - 220 €/га и до 420 €/га для DI-3), вызывая сомнения, что такие DI стратегии могут использоваться для небольших фермерских хозяйств.

Результаты сравнения FI стратегий режимов орошения с DI-RYL, приведенные в таблице 9, показывают, что в условиях 2001 и 2002 гг. нет экономии воды, а RYL – минимальны (<1%). По-иному выглядит 2003 год, в котором DI-RYL имеет на 1 полив меньше, чем FI, что соответствует экономии в 117 мм с RYL \approx 1%. При анализе DI-1 стратегии, экономия воды составляет 117 мм для 2001 и 2002 гг., и 233 мм в 2003 г., вызывая небольшое RY (RYL < 7% в сравнении с FI и < 6.5% по сравнению с DI-RYL). Такое возможно, потому что лучше используются влагозапасы почвы и подпитка грунтовыми водами, что ведет к небольшому различию в TWU (приблизительно 7%). Однако для DI-2 экономия оросительной воды брутто составляет 117 мм, но вместе с тем RYL значительно больше, в данное время 11-16%. Влияние на урожай – не очень большое, поскольку GC высокое (таблица 8), что способствует снижению TWU лишь на 17% в 2001 г. и на 22% - в 2003 г. Большая экономия оросительной воды возможна при DI-3, однако влияние на урожай – выше (19% < RYL < 25%) поскольку TWU - меньше (таблица 9). Результаты указывают на то, что водосберегающие стратегии подразумевают

усовершенствованные оросительные системы, которые позволяют выбирать величину оросительной нормы и создают условия для лучшего использования влагозапасов почвы и подпитки грунтовыми водами. Это включает в себя запаздывание первого полива для поддержки развития корневой системы растения и лучшего использования корневой зоны в почве.

Таблица 10. Стратегия полного орошения (FI) для выбранных сценариев эталонной эвапотранспирации [испаряемости]

Даты поливов

Среднее водопотребление	Высокое водопотребление	Очень высокое водопотребление	
14-06	05-06	25-05	
30-06	25-06	18-06	
14-07	09-07	03-07	
25-07	20-07	14-07	
05-08	31-07	24-07	
17-08	11-08	03-08	
28-08	24-08	13-08	
10-09	03-09	24-08	
	18-09	06-09	
		22-09	
Компоненты водного баланса	Среднее водопотребление	Высокое водопотребление	Очень высокое водопотребление
ASW при посеве (мм)	121	118	104
ASW при сборе урожая (мм)	46	53	72
Осадки (мм)	52	40	31
Подпитка грунтовыми водами (мм)	74	57	56
ETa (мм)	762	792	818
ETc (мм)	768	792	818

Таблица 11. Водный баланс при стратегии умеренного дефицитного орошения DI-RYL для выбранных сценариев эталонной эвапотранспирации [испаряемости]

Даты полива

Среднее водопотребление	Высокое водопотребление	Очень высокое водопотребление
30-06	25-06	19-06
15-07	09-07	03-07
26-07	21-07	14-07
06-08	31-07	24-07
17-08	11-08	03-08
01-09	27-08	13-08
15-09	07-09	28-08
		12-09

Компоненты водного баланса	Среднее водопотребление	Высокое водопотребление	Очень высокое водопотребление
Суммарная норма за вегетацию (мм)	560	560	630
ASW при посеве (мм)	121	118	104
ASW при сборе урожая (мм)	50	32	42
Осадки (мм)	52	40	31
Подпитка грунтовыми водами (мм)	77	75	78
ET _a (мм)	760	762	800
ET _c (мм)	768	792	818
RYL (%)	1	4	2

3.3. Усовершенствованные режимы орошения для выбранных сценариев эталонной эвапотранспирации

3.3.1. Режим орошения для получения максимально возможных урожаев
 Режимы орошения, направленные на максимальное увеличение урожая культуры (FI стратегии), и следовательно не допускающие водного стресса ($ET_a = ET_c$), анализировались средней, высокой и очень высокой эталонной эвапотранспирации, что соответствует среднему, засушливому и очень засушливому годам, определенным выше (соответственно 1973, 1971 и 1984 гг.). Результаты по этим стратегиям орошения представлены в таблице 10. Компоненты водного баланса – такие же, как в таблице 7, кроме осадков и величин полива, которые колеблются в зависимости от климатических условий.

3.3.2. Режимы дефицитного орошения

Результаты моделирования водного баланса для DI-RYL стратегии представлены в таблице 11. Сравнивая с FI стратегией (таблица 10), можно отметить, что для сухих и очень засушливых лет требуется на 1 полив меньше. Это вызывает небольшое воздействие на урожаи, с 4 и 2% RYL в такие годы.

Результаты по другим стратегиям DI обобщены в таблице 12. Они показывают, что при использовании DI-1 стратегии, количество поливов уменьшается на 1 по сравнению с DI-RYL, экономя таким образом 12% оросительной воды с относительно небольшим RYL (7 и 11%). Как уже говорилось выше, такие значения RYL меньше, поскольку здесь хорошо используются доступные влагозапасы почвы и относительно высок вклад грунтовых вод (таблица 12). DI-2 и DI-3 меньше количество использованной оросительной воды (25-33% для DI-2 и 38-44% для DI-3 стратегии} и относительно высокое воздействие на урожаи (RYL для DI-2 составляет 15-19% и 23-26% для DI-3 стратегии). Использование доступных влагозапасов почвы такое же как и для DI-1, но GC увеличивается с уменьшением количества поливов. Как было сказано в предыдущем разделе, такие воздействия на урожай могут быть экономически не оправданы, если рассматривать небольшие фермерские хозяйства.

Чтобы показать роль вклада грунтовых вод, на рис. 6 показано изменение вклада как доступных влагозапасов почвы, так и грунтовых вод на протяжении периода формирования урожая для сценария очень высокого нормативного климатического водопотребления. Моделирование выполнено для FI, DI-RYL, и DI-1 стратегий. Результаты показывают, что GC как правило ниже 1мм/сут для FI стратегии и увеличивается только в период пика водопотребления, когда ET_c является высоким. Подобная ситуация возникает для DI стратегии, однако при сравнении с FI, GC увеличивается в более поздний период вегетации, когда возникает дефицит влагозапасов почвы; такие увеличение GC выше для DI-1, в то время как ASW дефицит - высокий. То же самое можно видеть для DI-2 и DI-3, но с более продолжительным периодом и величиной GC, в то время как истощение почвы для этих стратегий гораздо больше.

3.3.3. Продуктивность воды и водосбережение

Для лучшего сравнения стратегий орошения, смоделированных для различных сценариев эталонной эвапотранспирации были оценены соответствующие им продуктивность воды и экономическая продуктивность воды. Результаты, представленные в таблице 13, показывают, что WP и EWP незначительно увеличиваются, когда стратегии дефицитного орошения сокращают общий объем использованной хлопком воды. Однако, такое незначительное увеличение WP и EWP сопровождается значительным уменьшением урожая и, как следствие, стоимости урожая.

Результаты показывают, что WP приблизительно одинаковы для FI и DI-RYL стратегий при среднем нормативном водопотреблении, но увеличиваются менее чем на 0.01 кг/м^3 (таблица 13). Для условий высокого и очень высокого нормативного водопотребления WP также увеличивается менее чем на 0.02 кг/м^3 для различных DI стратегий и всех условий нормативного водопотребления. EWP мало отличается при всех стратегиях орошения. Однако, при сравнении стратегий DI-RYL и DI-3 можно увидеть, что увеличение менее чем на 0.01 €/м^3 соответствует снижению стоимости урожая более чем на 360 €/га . Результаты этого анализа говорят о том, что выбор водосберегающих стратегий, основанный на WP и/или EWP, не корректен.

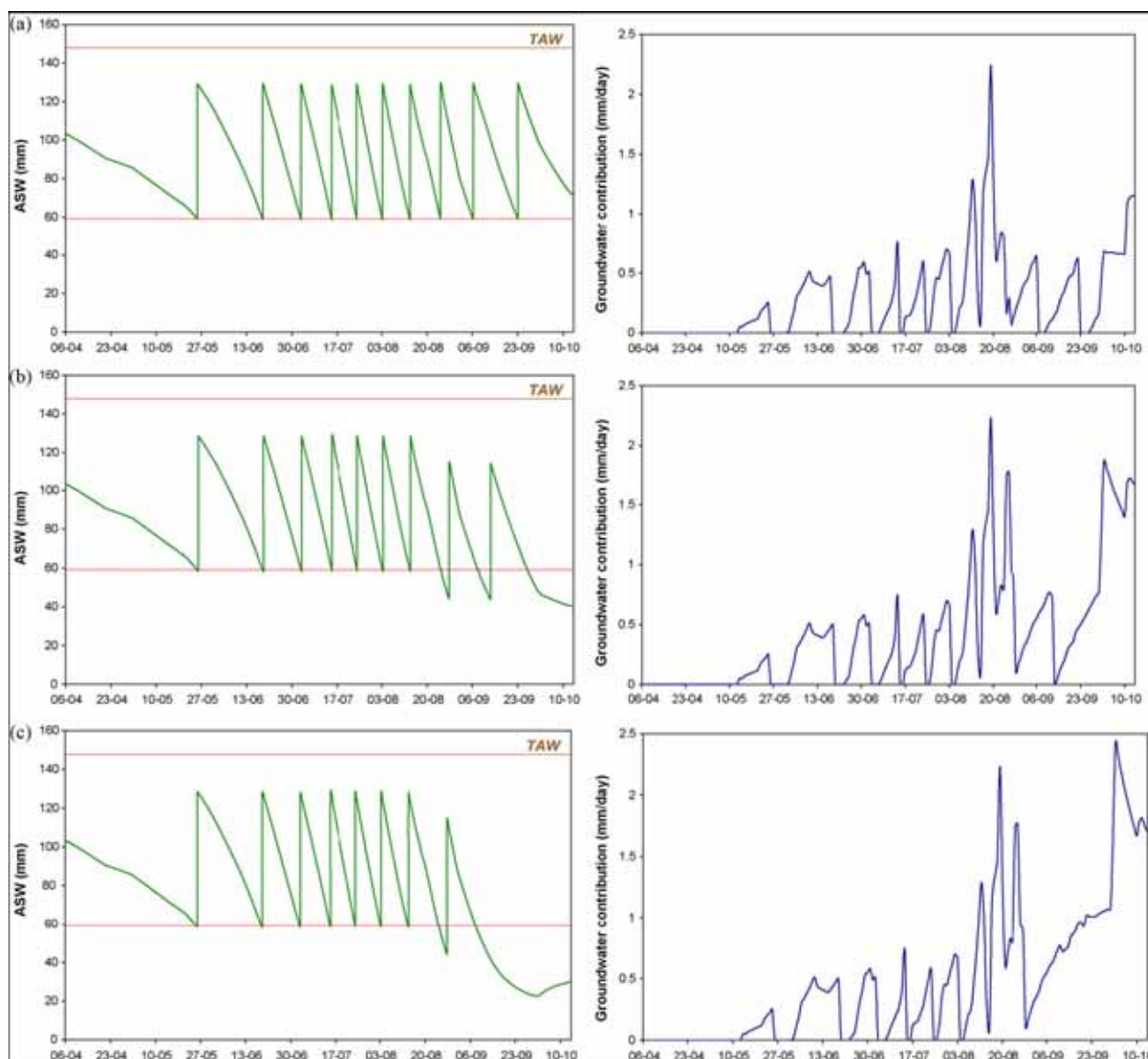


Рис. 6 – Сезонная изменчивость продуктивных влагозапасов почвы (рисунки слева) и подпитки грунтовыми водами (рисунки справа) для разных стратегий режимов орошения: (а) FI, (б) DI-RYL и (с) DI-1 для сценария очень высокой эталонной эвапотранспирации [испаряемости].

Таблица 12 – Результаты для стратегий дефицитного орошения DI-1, DI-2 и DI-3.

Условие водопотребления	Стратегия орошения	Полив за сезон (мм)	ASW при посадке (мм)	ASW при сборе урожая (мм)	Подпитка грунтовыми водами (мм)	ETa (мм)	RYL (%)
Среднее	DI-1	490	121	37	93	720	7
	DI-2	420		34	105	664	15
	DI-3	350		33	122	611	23
Высокое	DI-1	490	118	25	87	711	11
	DI-2	420		23	97	653	19
	DI-3	350		23	115	601	26
Очень высокое	DI-1	560	104	32	93	754	9
	DI-2	490		30	103	697	16
	DI-3	420		29	122	646	23

Таблица 13 - Моделирование оросительной нормы брутто, общего количества использованной воды (TWU), урожая, продуктивности воды, стоимости урожая и экономической продуктивности воды для усовершенствованных режимов орошения и выбранных сценариев водопотребления

Сценарии водопотребления	Стратегия орошения	Оросительная норма брутто (мм)	TWU (мм)	Урожай (кг/га)	WP (кг/м ³)	Стоимость урожая (€/га)	EWP (€/м ³)
Среднее	FI	933	1134	3769	0.332	1741	0.154
	DI-RYL	930	1130	3758	0.332	1736	0.153
	DI-1	817	1046	3540	0.338	1635	0.156
	DI-2	700	944	3235	0.343	1494	0.158
	DI-3	583	845	2947	0.349	1361	0.161
Высокое	FI	1050	1212	3718	0.307	1718	0.142
	DI-RYL	933	1134	3563	0.314	1646	0.145
	DI-1	817	1037	3300	0.318	1524	0.147
	DI-2	700	932	3000	0.322	1386	0.149
	DI-3	583	833	2732	0.328	1262	0.152
Очень высокое	FI	1168	1286	3767	0.293	1740	0.135
	DI-RYL	1050	1221	3676	0.301	1698	0.139
	DI-1	933	1129	3443	0.305	1590	0.141
	DI-2	817	1025	3154	0.308	1457	0.142
	DI-3	700	928	2896	0.312	1338	0.144

Анализ собранных данных и данных, полученных при помощи моделирования, делает очевидным тот факт, что стратегии, ведущие к относительно высоким потерям урожая (DI-2 и DI-3, с RYL соответственно больше, чем 15 и 23%) должны применяться лишь в тех случаях, когда ресурсы оросительной воды очень ограничены. Однако, может быть было бы более разумно сократить орошаемую площадь и использовать в этом случае менее строгие режимы, такие как DI-1 или DI-RYL. В действительности, RYL колеблется в пределах 7-10% для стратегии DI-1 (таблица 12) и 1- 4% для DI-RYL (таблица 11), в то время как соответствующий объем брутто сэкономленной оросительной воды колеблется между 10 и 22% для сценариев высокой и очень высокой эталонной эвапотранспирации.

Использование модели, имитирующей режимы орошения, для оказания помощи фермерам в виде консультаций по выбору более подходящих режимов, было продемонстрировано в полевых условиях (Cholpankulov et al., 2005). Следовательно,

результаты этого исследования могут стать вкладом в дело усовершенствования водосберегающего орошения в Средней Азии, особенно в Ферганском регионе. Тем не менее, для осуществления стратегии водосбережения необходимо усовершенствование соответствующего режима доставки и характеристик бороздкового орошения, о чем также говорится у Хорста (Horst et al., 2005, 2007).

4. Заключение

Применяемые в настоящее время в Фергане режимы орошения хлопка показывают очень невыгодное использование воды из-за глубокого ее просачивания и плохого использования доступных влагозапасов почвы и подпитки грунтовыми водами. Для внедрения в практику водосбережения и борьбы с глубоким просачиванием необходимы усовершенствованные режимы орошения. Все это может быть основано на использовании имитационных моделей, в которых используются улучшенные параметрические зависимости культуры, полученные после соответствующей процедуры калибровки и оценки, как показано в данном исследовании.

Моделирование было выполнено для двух наборов данных, один из которых – это суточные данные за период полевого эксперимента, по которым была выполнена калибровка и проверка модели (2001-2003), и второй набор – декадные метеорологические данные за период 1970-2003 гг. Первый набор относится к влажным годам, в то время как анализ с использованием второго набора был выполнен для среднего, сухого и очень засушливого года. Были использованы стратегия полного орошения и различные стратегии дефицитного орошения. Результаты показывают, что вклад грунтовых вод может играть существенную роль, так как он доходит до 30% общего водопотребления сельхозкультуры при использовании стратегий дефицитного орошения. Результаты также показывают, что использование стратегии дефицитного орошения приводит к лучшему использованию доступных влагозапасов почвы и грунтовых вод, т.е. исследуя необходимость минимизировать снижение урожая из-за недостатка поливов, управление орошением должно обеспечить максимальное использование почвенной влаги и подпитки грунтовыми водами.

При сравнении смоделированных режимов было замечено, что значительный дефицит орошения ведет к относительно высоким потерям урожая, в то время как продуктивность воды и экономическая продуктивность воды лишь слегка увеличиваются. Поэтому такие стратегии с экономической точки зрения вызывают сомнение, особенно если рассматривать малые фермерские хозяйства. В отличие от этого, умеренное дефицитное орошение, способствующее относительно высокой экономии оросительной воды, до 25%, при небольших потерях урожая, не превышающих 11%, можно рассматривать в качестве дальнейшего усовершенствования орошения в изучаемом регионе. Тем не менее, необходимо также улучшить оросительные системы фермерских хозяйств и график подачи воды.

Благодарность

Данные исследования были профинансированы в рамках проекта EU-INCO ICA2-CT-2000-10039. Благодарим также Сельскохозяйственный научно-технический центр за поддержку (проект РОСТИ-SFA-7-245).

Литература

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, FAO, Rome, 300 pp.
- Barker, G.L., 1982. Equation for estimating cotton preharvest losses. Trans. ASAE 25 (2), 271–276 282.
- Barker, G.L., 1996. Equilibrium moisture content of cotton plant components. J. Agric. Eng. Res. 63, 353–364.
- Barker, G.L., Laird, J.W., 1993. Drying and humidification rates for cotton lint. Trans. ASAE 36 (6), 1555–1562.
- Bhattarai, S.P., McHugh, A.D., Lotz, G., Midmore, D.J., 2006. The response of cotton to subsurface drip and furrow irrigation in a vertisol. Exp. Agric. 42 (1), 29–49.
- Bruce, R.R., Shipp, C.D., 1962. Cotton fruiting as affected by soil moisture regime. Agron. J. 61, 15–18.
- Cancela, J.J., Cuesta, T.S., Neira, X.X., Pereira, L.S., 2006. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of Northern Spain. Biosyst. Eng. 94 (1), 151–163.

- Eholpankulov, E.D., Inchenkova, O.P., Paredes, P., Pereira, L.S., 2005. Strategies for irrigation scheduling to cope with water scarcity. In: Pereira, L.S., Dukhovny, V.A., Horst, M.G. (Eds.), *Irrigation Management for Combating Desertification in the Aral Sea Basin. Assessment and Tools*. Vita Color Publish, Tashkent, pp. 125–147.
- Eholpankulov, E.D., Inchenkova, O.P., Paredes, P., Pereira, L.S., 2008. Cotton irrigation scheduling in Central Asia: Model calibration and validation with consideration of groundwater contribution. *Irrig. Drain.* 57, 516–532.
- Dalton, P., Raine, S., Broadfoot, K., 2001. Best management practices for maximizing whole farm irrigation efficiency in the cotton industry. Final report for CRDC Project NEC2C. National Centre for Engineering in Agriculture Publication 179707/2, USQ, Toowoomba.
- Dagdelen, N., Ersel, Y., Sezgin, F., Gurbuz, T., 2006. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. *Agric. Water Manage.* 82 (1–2), 63–85.
- DeTar, W.R., 2008. Yield and growth characteristics for cotton under various irrigation regimes on sandy soil. *Agric. Water Manage.* 95, 69–76.
- Domullodjanov, Kh.D., 1983. Recommendations for Calculating Irrigation Regimes when Programming Yields in Cotton Rotation in Tajik SST. SANIIRI, Dushanbe, 74 pp. (in Russian).
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield Response to Water. FAO Irrig. Drain. Paper 33, FAO, Roma.
- Dukhovny, V.A., Yakubov, Kh., Umarov, P.D., 2005. Drainage and salinity control: review of related problems in Central Asia. In: Pereira, L.S., Dukhovny, V.A., Horst, M.G. (Eds.), *Irrigation Management for Combating Desertification in the Aral Sea basin. Assessment and Tools*. Vita Color Publisher, Tashkent, pp. 247–268.
- Ertek, A., Kanber, R., 2003. Effects of different drip irrigation programs on boll number and shedding percentage and yield of cotton. *Agric. Water Manage.* 60, 1–11.
- Falkenberg, N.R., Giovanni, P., Cothren, J.T., Leskovar, D.I., Rush, C.M., 2007. Remote sensing of biotic and abiotic stress for irrigation management of cotton. *Agric. Water Manage.* 87 (1), 23–31.
- FAO, 2004. General Summary for the Countries of the Former Soviet Union. AQUASTAT, FAO, Rome. (<http://www.fao.org/>).
- FAS-USDA, 2002. Uzbekistan trip report 11/2002. USA, 10 pp. (<http://www.fas.usda.gov/>).
- Fortes, P.S., Platonov, A.E., Pereira, L.S., 2005. GISAREG—A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. *Agric. Water Manage.* 77, 159–179.
- Gerik, T.J., Faver, K.L., Thaxton, P.M., El-Zik, K.M., 1996. Late season water stress in cotton. I: Plant growth, water use, and yield. *Crop Sci.* 36, 914–921.
- Gibb, D., Neilsen, J., Constable, G., 2004. Cotton growth responses to water stress. In: *WATERpak, A Guide for Irrigation Management in Cotton, Cotton Catchment's Communities*, Austr. Cotton Res. Inst., pp. 117–126.
- Grimes, D.W., Yamada, H., 1982. Relation of cotton growth and yield to minimum leaf water potential. *Crop Sci.* 22, 134–139.
- Grimes, D.W., Yamada, H., Dickens, W.L., 1969. Functions for cotton (*Gossypium hirsutum* L.) production from irrigation and nitrogen fertilization variables. I: Yield and evapotranspiration. *Agron. J.* 61, 769–773.
- Horst, M.G., Shamutalov, Sh.S., Pereira, L.S., Goncalves, J.M., 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agric. Water Manage.* 77, 210–231.
- Horst, M.G., Shamutalov, Sh.Sh., Goncalves, J.M., Pereira, L.S., 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agric. Water Manage.* 87 (2), 115–127.
- Howell, T.A., Evett, S.R., Tolk, J.A., Schneider, A.D., 2004. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the northern Texas High Plains. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130 (4), 277–285.

- Jackson, E.B., Tilt, P.A., 1968. Effects of irrigation intensity and nitrogen level on the performance of eight varieties of upland cotton, *Gossypium hirsutum* L. *Agron. J.* 60, 13–17.
- Karam, F., Rafic, L., Randa, M., Daccache, A., Mounzer, O., Roupahel, Y., 2006. Water use and lint yield response of drip irrigated cotton to length of season. *Agric. Water Manage.* 85 (3), 287–295.
- Laktaev, N., 1978. Cotton Irrigation. Kolos Publ., Moscow (in Russian).
- Liu, Y., Pereira, L.S., Fernando, R.M., 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agric. Water Manage.* 84, 27–40.
- Pereira, L.S., 2007. Relating water productivity and crop evapotranspiration. In: Lamaddalena, N., Shatanawi, M., Todorovic, M., Bogliotti, C., Albrizio, R. (Eds.), *Water Use Efficiency and Water Productivity: Proceedings of WASAMED Workshop, Amman, Jordan, October 2005, Options Me' diterrane'ennes Ser. B* 57, 31–50.
- Pereira, L.S., Dukhovny, V.A., Horst, M.G. (Eds.), 2005. *Irrigation Management for Combating Desertification in the Aral Sea basin. Assessment and Tools.* Vita Color Publisher, Tashkent.
- Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manage.* 57, 175–206.
- Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N., Teixeira, J.L., 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.), *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions.* Kluwer, Dordrecht, pp. 161–180.
- Pereira, L.S., Goncalves, J.M., Dong, B., Mao, Z., Fang, S.X., 2007. Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the Upper Yellow River Basin, China. *Agric. Water Manage.* 93 (3), 109–122.
- Pettigrew, W.T., 2004a. Moisture deficit effects on cotton lint yield, yield components, and boll distribution. *Agron. J.* 96, 377–383.
- Pettigrew, W.T., 2004b. Crop physiology and metabolism: physiological consequences of moisture deficit stress in cotton. *Crop Sci.* 44 (4), 1265–1272.
- Popova, Z., Pereira, L.S., 2008. Irrigation scheduling for furrow irrigated maize under climate uncertainties in the Thrace Plain, Bulgaria. *Biosyst. Eng.* 99, 587–597.
- Popova, Z., Eneva, S., Pereira, L.S., 2006. Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments. *Biosyst. Eng.* 95 (1), 139–149.
- Shreder, V.R., Vasiliev, I.K., Trunova, T.A., 1977. Hydromodule zoning and calculation of irrigation norms for cotton under arid conditions. In: Kadirov, A.A. (Ed.), *Design and Efficiency of Irrigation and Drainage System Performance in Central Asia*, vol. 8SANIIRI, Tashkent, pp. 28–41 (in Russian).
- Smith, M., Pereira, L.S., Berengena, J., Itier, B., Goussard, J., Ragab, R., Tollefson, L., Van Hoffwegen, P. (Eds.), 1996. *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice.* FAO Water Report 8, FAO, Rome, 384 pp.
- Stewart, J.L., Hanks, R.J., Danielson, R.E., Jackson, E.B., Pruitt, W.O., Franklin, W.T., Riley, J.P., Hagan, R.M., 1977. Optimizing Crop Production Through Control of Water and Salinity Levels in the Soil. *Utah Water Res. Lab. Rep. PRWG151-1*, Utah St. Univ., Logan.
- Teixeira, J.L., Pereira, L.S., 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bull.* 41 (2), 29–48.
- Turner, N.C., Hearn, A.B., Begg, J.E., Constable, G.A., 1986. Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) physiological and morphological responses to water deficits and their relationships to yield. *Field Crops Res.* 14, 153–170.
- Yazar, A., Sezen, S.M., Sesveren, S., 2002. LEPA and trickle irrigation of cotton in the southeast Anatolia project (GAP) area in Turkey. *Agric. Water Manage.* 54, 189–203.