
Часть 3

ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОЕ ОРОШЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ВОДОЙ

Глава 6.

СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ГРАФИКА ПОЛИВОВ: WINISAREG И GISAREG

П.С. Фортес¹⁰, П.Р. Теodoro¹⁰, А.А. Кампос¹⁰, П.М. Матеус¹⁰,
Л.С. Перейра¹⁰

Реферат: ISAREG – это концептуальная нераспределенная водно-балансовая модель для расчета графиков полива сельхозкультур на уровне поля и расчета требований на орошение при оптимальных условиях и/или в условиях водного стресса. WINISAREG – это версия этой модели для Windows, которая содержит две программы поддержки, одну для создания соответствующих входных данных по сельхозкультуре KCISA, другую для расчета эталонной эвапотранспирации EVAP56. GISAREG – это географическая информационная система (ГИС), основанная на объединении ISAREG и KCISA, разработанная для применения в бассейне Аральского моря в качестве поддержки внедрения усовершенствованного управления орошением на уровне хозяйства. Интеграция касается создания пространственных и климатических баз данных, функционирования моделей для различных сценариев управления водой и создания карт полива сельхозкультур и поливных норм в зависимости от времени при выбранных режимах агрегации. Результирующая информация по альтернативным графикам поливов является, следовательно, пространственно распределенной и используется для идентификации приемов, ведущих к водосбережению и обеспечению контроля засоления. Статья содержит краткое описание WINISAREG и GISAREG, а также интеграции баз данных и моделей и их использование.

¹⁰ Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, Fax: (351 21) 362 15 75; lspereira@isa.utl.pt

Ключевые слова: баланс почвенной влаги, требования на орошение сельхозкультур, график поливов, водосбережение, ГИС.

Введение

Модель ISAREG для расчета графика поливов уже долгое время применяется в нескольких частях света для оценки текущих графиков полива, выбора наиболее соответствующих графиков полива для нескольких сельхозкультур и для расчета, с использованием серии климатических данных, требований сельхозкультур на орошение (Teixeira & Pereira, 1992, Liu *et al.*, 1998). Позднее, с использованием последней методологии ФАО по эвапотранспирации сельхозкультур (Allen *et al.*, 1998), была разработана KCISA (Rodrigues *et al.*, 2000) и присоединена к модели ISAREG для создания соответствующих входных данных по сельхозкультуре. Эталонная эвапотранспирация рассчитывается при помощи программы EVAP56 по методу ФАО Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). WINISAREG является версией этой модели для Windows, объединяющей ISAREG с KCISA и EVAP56 (Pereira *et al.*, 2003) и совсем недавно была значительно усовершенствована применительно к условиям Центральной Азии.

Главной особенностью модели является ее способность рассчитывать альтернативные графики поливов, относящихся к различным допустимым уровням водного стресса растений, а также к различным ограничениям на доступность воды. Альтернативные графики поливов оцениваются по относительным потерям урожая, при эвапотранспирации сельхозкультур ниже ее потенциального уровня. Примеры успешного применения модели для поверхностного полива в Средиземноморском регионе представлены у Oweis *et al.* (2003) и Zairi *et al.* (2003). Кроме того, WINISAREG содержит опцию расчета подпитки из грунтовых вод при помощи параметрической функции (Liu *et al.*, 2001), успешно тестируемую в Центральной Азии (Чолпанкулов и др., 2005). Этими авторами описано применение WINISAREG.

Когда процедура расчетов применяется в масштабе региона, она становится тяжеловесной и медленной из-за рассмотрения большого числа комбинаций характеристик полей и сельхозкультур, агрегированных в масштабе сектора или проекта. Несмотря на это, пространственно распределенные характеристики входных данных, требуемых ISAREG и KCISA, делает их интеграцию с географической информационной системой (ГИС) особенно заманчивой и полезной. В результате, предполагая, что каждое поле однородно, возможно автоматически вызвать модель для каждого возделываемого поля, представленного в ГИС в разделе полей, а затем, используя разновидности отличительных свойств расширить масштабы при-

менения полученных результатов (Fortes *et al.*, 2005). Это основной прием, принятый в GISAREG, являющейся версией ГИС для модели ISAREG.

В рамках данного проекта было разработано применение GISAREG. К специфическим целям относятся расчет пространственно распределенных требований сельхозкультур на орошение, информация поддержки для фермеров и менеджеров, связанная с альтернативными приемами расчета графика водосберегающих поливов и моделирование требований, агрегированных на основных узловых точках распределителей оросительных систем (Fortes *et al.*, 2005).

Описание модели

Модель ISAREG является моделью расчета графика поливов, рассчитывающей баланс почвенной влаги на уровне поля, как это описано Teixeira & Pereira (1992) и Liu *et al.* (1998). Водный баланс рассчитывается для многослойной почвы и следует классическому подходу Doogenbos & Pruitt (1977). В зависимости от наличия климатических данных, приняты различные шаги по времени, от суточных до месячных. Входными данными являются осадки, потенциальная подпитка из грунтовых вод, эталонная эвапотранспирация (ET_0), суммарная и легкодоступная почвенная влага, влажность почвы к моменту сева и факторы сельхозкультуры, связанные с фазами развития растений, коэффициенты сельхозкультур, глубина корнеобитаемой зоны и фактор отзывчивости «вода-урожай» (рис. 1). Входные данные модели можно либо ввести с клавиатуры в процессе работы или загрузить предварительно созданные ASCII файлы.

Модель ISAREG рассчитывает графики поливов соответственно вариантам, определенным пользователем, таким как:

- определить график поливов на уровень максимальной урожайности, т.е. без водного стресса растений
- определить график поливов, используя выбранные критические уровни орошения, включая допустимый водный стресс и соответствующие ограничения на воду, налагаемые в заданные периоды времени
- оценить влияние данного графика поливов на урожайность и водопотребление
- проверить характеристики модели на данных наблюдений за почвенной влагой и при использовании фактических дат полива и поливных норм
- рассчитать водный баланс без орошения
- рассчитать требования на орошение нетто, включая использование частотного анализа требований на орошение, когда рассматриваются серии климатических данных.

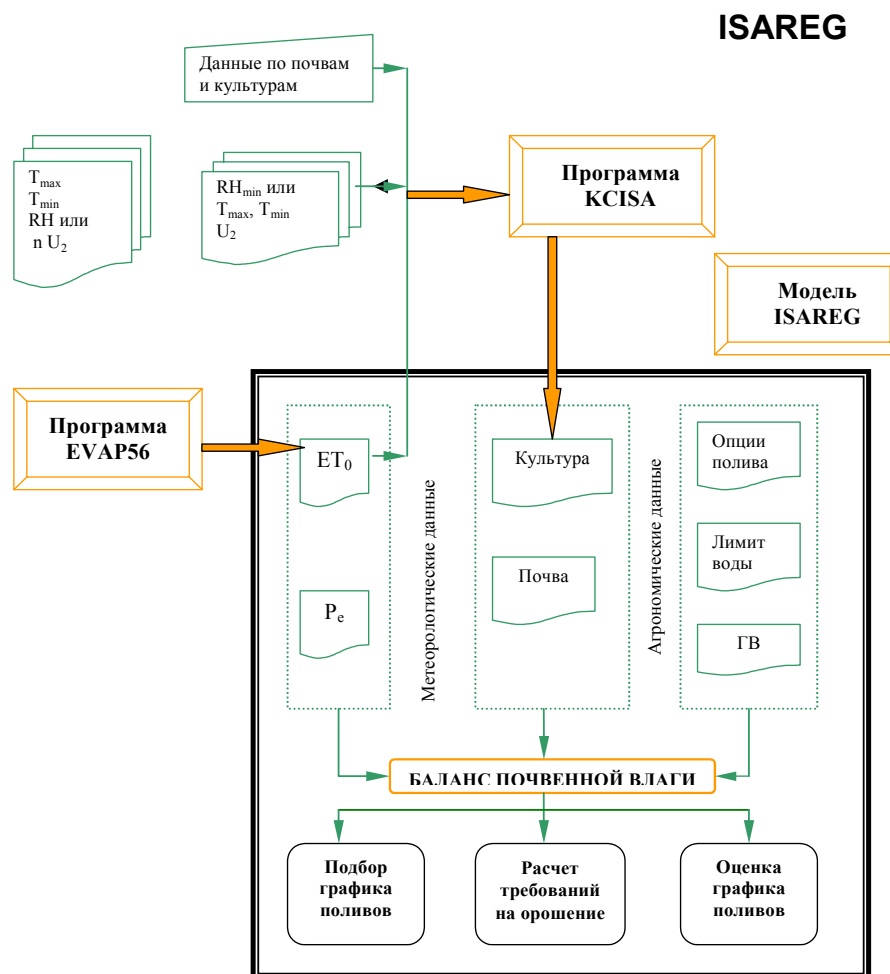


Рис. 1. Схема модели ISAREG и ее связь с программами KCISA и EVAP56

WINISAREG

WINISAREG – последняя версия модели для Windows (Pereira *et al.*, 2003). Модель имеет две дополнительные программы EVAP56 и KCISA для расчета факторов сельхозкультуры. В зависимости от наличия климатических данных, EVAP56 выполняет расчет ET_0 любыми альтернативными методами, предлагаемыми в Руководстве ФАО 56 (Allen *et al.*, 1998). EVAP56 требуется информация о температуре, относительной влажности воздуха, скорости ветра и солнечной радиации (рис. 2). Таким образом, кроме этого, потребуются некоторые характеристики метеостанции – широта, высота над уровнем моря и высота расположения анемометра. На рис. 3 приведены примеры выходных данных EVAP56.

KCISA использует методологию ФАО (Allen *et al.*, 1998) при расчете осредненных во времени коэффициентов сельхозкультуры для начала, середины и конца сезона ($K_{c_{ini}}$, $K_{c_{mid}}$ и $K_{c_{end}}$), истощение почвенной влаги без стресса растений (p) и эффективную глубину корнеобитаемой зоны (Z_r) для

каждой фазы развития растений (Rodrigues *et al.*, 2000). Рассматриваются четыре периода развития: начальный, развитие сельхозкультуры, середина и конец сезона. KCISA требуются данные по сельхозкультуре, почве и метеорологическим параметрам. В модель может быть введена дополнительная информация об орошении культуры (рис. 4 и 5).

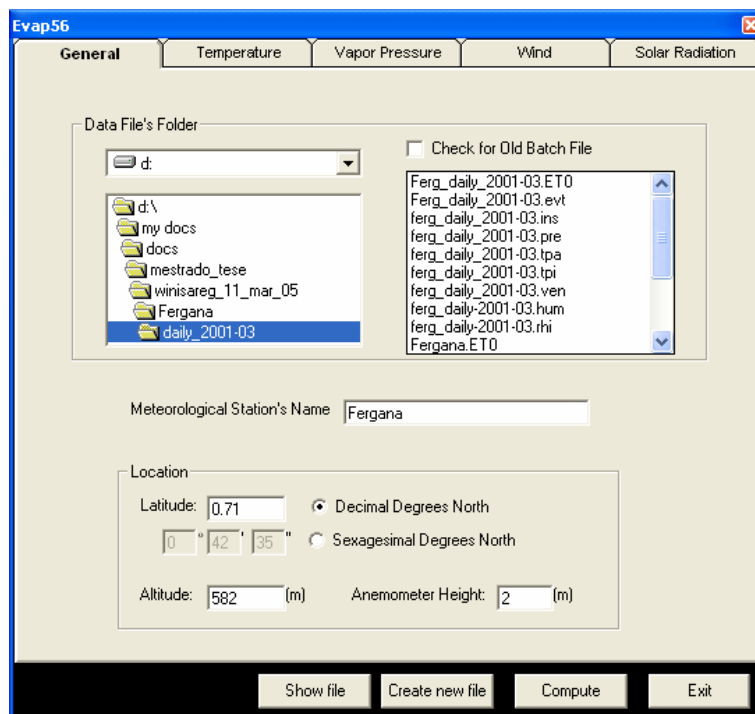


Рис. 2. Главное меню расчета ET_0

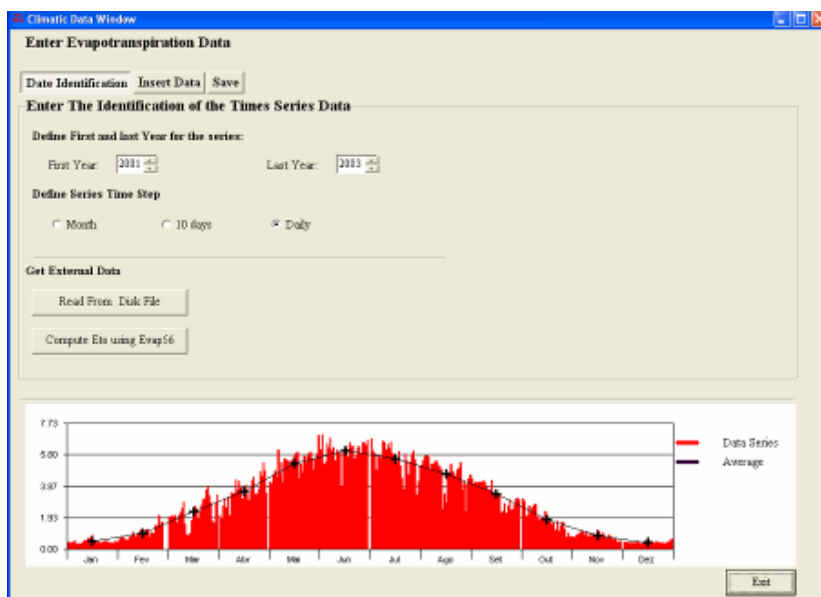


Рис. 3. Окно для ввода исходных данных и ознакомления с вычисленными ET_0

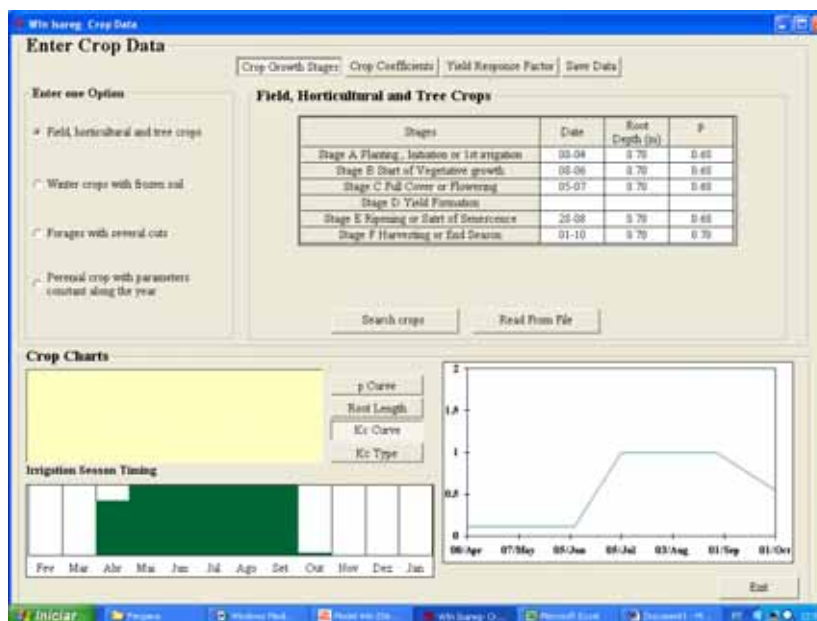


Рис. 4. Интерфейс WINISAREG для данных по сельхозкультуре

В WINISAREG содержится алгоритм для учета воздействия засоления на ET_c и урожайность (Campos *et al.*, 2003). Модель начинает расчеты почвенной влаги с исходной влажности почвы, задаваемой пользователем, или рассчитывает из предшествующего периода нахождения почвы под паром в конце лета, когда большая часть почвенной влаги истрачена, или зимой, когда можно предположить подпитку почвенной влаги. Последняя версия этих процедур представлена Campos *et al.* (2003).

В WINISAREG содержится алгоритм усовершенствованного расчета подпитки из грунтовых вод и фильтрации (рис. 6). Подпитка из грунтовых вод является функцией уровня залегания грунтовых вод, запаса почвенной влаги, почвенных характеристик, зависящих от капиллярности и ET_c (Liu *et al.*, 2001). Примеры тестирования этого алгоритма даны у Чолпанкулова и др. (2005).

Водно-балансовая модель ISAREG подтверждена многочисленными применениями, например, Liu *et al.* (1998), Oweis *et al.* (2003) и Zairi *et al.* (2003). Для бассейна Сырдарьи она была подтверждена при помощи соответствующих наборов данных по почвенной влаге и метеоданных, относящихся к ранее выполненным наблюдениям на хлопчатнике в Голодной степи и полевым исследованиям на хлопчатнике и пшенице в Ферганской долине (Чолпанкулов и др., 2005).

Kc FAO56

General Crop Soil Climatic Irrigation Compute

Name: ferg_cot1_p04_kc_p_20jan05 See Tables

Type: Field, horticultural and tree crops

Stages Dates:

Stage	Date	Interval
Stage A Planting, Initiation or 1st irrigation	08-04	61
Stage B Start of Vegetative growth	08-06	27
Stage C Full Cover or Flowering	05-07	54
Stage E Ripening or Start of Senescence	28-08	34
Stage F Harvesting or End Season	01-10	

Soil Water Depletion fraction for no stress: p Value 0.63

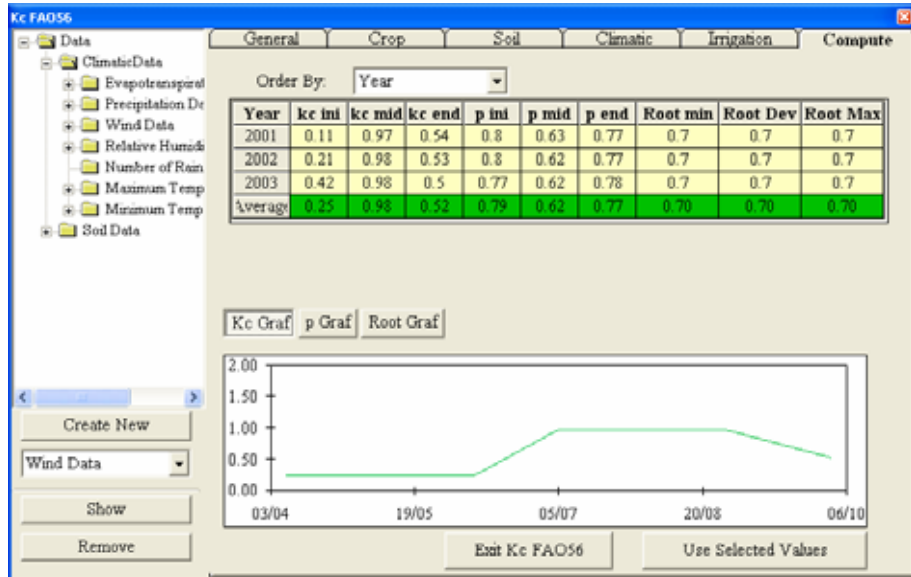
Yield Response Factor: Ky 0.85

Root Depth: Min: 0.70, Max: 0.70

Maximum Crop Height: Max crop Height 1.2

Crop Kc: Mid Season 1.00, End season Kc 0.55

a)



b)

Рис. 5. Интерфейс Windows для: (а) ввода данных по сельхозкультуре и (б) показа данных расчета

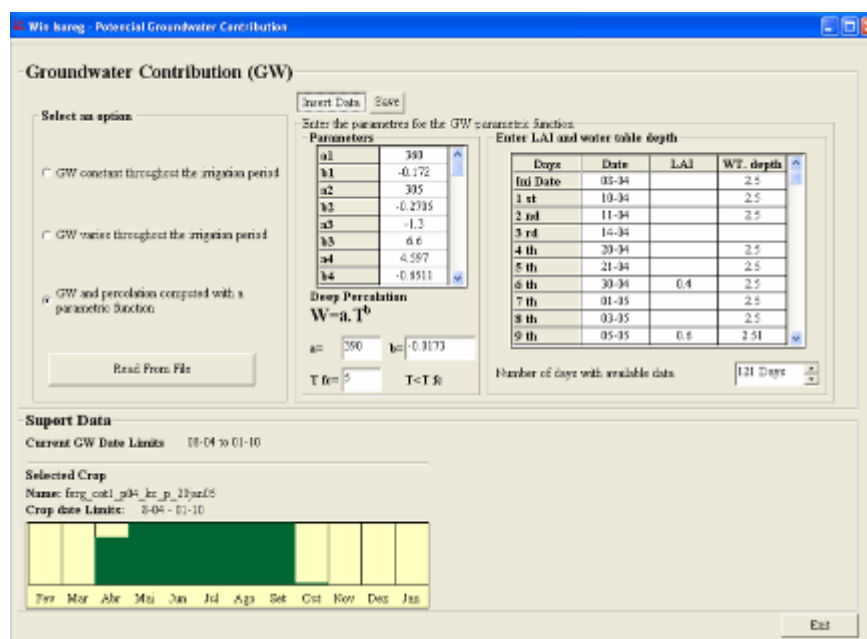


Рис. 6. Интерфейс WINISAREG для расчета подпитки из грунтовых вод, используя параметрическое уравнение

GISAREG

Особенности GISAREG

Объединение программ ISAREG и KCISA с ГИС следует стратегии тесной взаимосвязи, разработанной в коммерческой ГИС (ArcView 3.2) на языке программирования Avenue script. KCISA и ISAREG были конвертированы в динамически связанные библиотеки (DLL). DLL является набором компилированных процедур или функций, которые можно вызвать из другого приложения и связаться с ним во время работы программы. Это дает возможность сгладить интеграцию между ГИС и имитационными моделями. В отличие от WINISAREG, где программы KCISA и EVAP56 объединены с моделью, в GISAREG приняты индивидуальные связи с ГИС, поэтому расчеты при помощи EVAP56 выполняются из ГИС и данные ET_0 вводятся в GISAREG.

GISAREG не выполняет все опции ISAREG, а только те, которые требуются для удовлетворения рассматриваемых целей: составить график поливов с целью максимизировать урожай; смоделировать график поливов при допустимом уровне водного стресса в зависимости от выбранных пользователем критических уровней орошения и ограничениях водоподдачи; рассчитать водный баланс без орошения; и рассчитать требования на орошение нетто. При наличии набора метеоданных за многолетний период можно выполнить частотный анализ требований на орошение.

Компонент применения ГИС дает возможность моделирования различных выбранных пользователем *имитационных сценариев* и использования специфических средств для их создания и управления. Имитационный сценарий имеет дело с данным пространственным распределением сельхозкультуры, способов полива, вариантов графика полива и ограничений водоподачи.

Расчеты GISAREG выполняются в следующем порядке:

- Загрузка пространственной и непространственной баз данных
- Совмещение ГИС программы для идентификации основных характеристик каждого возделываемого поля, относительно почвы и климата для создания таблицы расчетов по умолчанию
- Создание входных файлов ISAREG и KCISA, как указывалось выше
- Вызов KCISA и ISAREG для каждого поля, составляющего единицу расчета, расчет требований на орошение этой сельхозкультуры и графика поливов по выбранному пользователем сценарию
- Считывание ГИСом выходных данных ISAREG для картирования и объединения результатов.

Важной особенностью GISAREG является то, что поле характеризуется сочетанием сельхозкультур, характеристик почвы и климата; затем KCISA рассчитывает входные файлы по соответствующим сельхозкультуре и почвам для ISAREG; эти файлы вместе с файлами данных по ET и осадкам используются для расчета ISAREG, следуя сценарию; и результаты наносятся на карту ГИС для выбранной области в соответствии с заданными данными или суммируются для выбранного периода времени.

База данных

База данных ГИС состоит из точечных данных и полигонов, первые относятся к метеоданным, а вторые – к почвам, сельхозкультурам и полевым данным. Метеоданные могут быть за один или более лет. В последнем случае возможно осуществить многократное моделирование для определения частоты требований сельхозкультуры на орошение или осуществления анализа планирования поливов в соответствии с выбранными годами, такими как сухой, влажный или год средней влажности.

Метеорологические станции идентифицируются, а соответствующие метеоданные сохраняются в различных ASCII-файлах, отформатированных в соответствии с требованиями ISAREG и KCISA: слой осадков (мм), эталонная эвапотранспирация (мм/сутки), скорость ветра (м/с или км/час), минимальная относительная влажность RHmin (%) или при отсутствии этих данных, максимальная и минимальная температура (°C) для расчета RHmin, и количество дней с осадками за месяц.

Для сохранения непространственных данных, которые будут объединяться с соответствующим тематическим полигоном ГИС, используется база данных MS Access, имеющая следующую структуру:

- *Таблица последовательности сельхозкультур*, которая определяет последовательность однолетних культур и связывает их с данными по этим культурам и данными по способу орошения. Она содержит: код сельхозкультуры, название, код озимой сельхозкультуры, код способа орошения озимой культуры, код летней культуры и код способа орошения летней культуры
- *Таблица сельхозкультур*, содержащая код идентификации культуры и ее название, код разновидности сельхозкультуры (1 = «голая почва», 2 = «однолетняя культура» и 3 = «однолетняя культура с морозным периодом»), дата сева, продолжительность (в сутках) каждой фазы развития, Кс для периодов развития сельхозкультуры, максимальная высота растений (м), максимальная и минимальная эффективные глубины корнеобитаемой зоны (м), доля истощения почвенной влаги без стресса растений и фактор отзывчивости «вода-урожай». Код разновидности сельхозкультуры используется при идентификации периода, предшествующего возделываемой культуре, для оценки начальной влажности почвы (1), самой сельхозкультуры (2), и сельхозкультуры с периодом, когда производятся расчеты для замерзшей почвы (3)
- *Таблица способов орошения*: код идентификации способа орошения, название, доля поверхности почвы, увлажняемой при поливе, число поливов и соответствующие поливные нормы (мм)
- *Таблица почвогрунтов*: код идентификации почвы, название, процентное содержание глины, пыли и песка, влажность почвы при полевой влагоемкости, влажность завядания и глубина испаряющего слоя почвы (мм)

Основные характеристики каждого поля идентифицируются ГИСом через пространственные данные, относящиеся к сельхозкультурам, почвам и метеостанциям. Они должны быть обеспечены следующими входными тематическими данными:

- Полигоном с границами возделываемых полей с присоединенной таблицей полевых атрибутов, включая код идентификации каждого поля, идентификацию последовательности однолетних культур и другую уместную информацию по желанию пользователя
- Полигоном с границами типа почв, имеющего присоединенную таблицу с атрибутами почвы, и идентификацией почвы соответствующим кодом
- Точечные данные, привязанные к месторасположению метеорологических станций, также связанных с таблицей атрибутов, в которой метеорологические станции идентифицированы соответствующим кодом.

Работа с пространственными данными

Работа GISAREG начинается с загрузки базы пространственных и непространственных данных, контролируемой ГИСом при помощи процедуры перекрытия, которая дает возможность идентификации характеристик почвы, климата и выращиваемой сельхозкультуры на каждом возделываемом поле, далее создается *расчетная таблица*.

ГИС генерирует полигон Thiessen, который определяет географическую зону влияния каждой метеорологической станции (рис. 7). Путем перекрытия метеорологических точек, а затем соответствующих полигонов Thiessen с полигонами полей определяются, как показано на рис. 1, метео-данные для каждого поля. В этом исследовании рассматривались три метеорологические станции. Кроме того, также осуществлялся выбор полей для расчетов по модели. Неводелываемые поля, в основном, исключались. Еще одна операция заключалась в выполнении пересечения (наложения) между почвенными данными и возделываемыми полями при помощи идентификации преобладающего типа почв в каждом полевом полигоне, определяя таким образом характеристики только одного типа почвы для каждого поля (рис. 7).

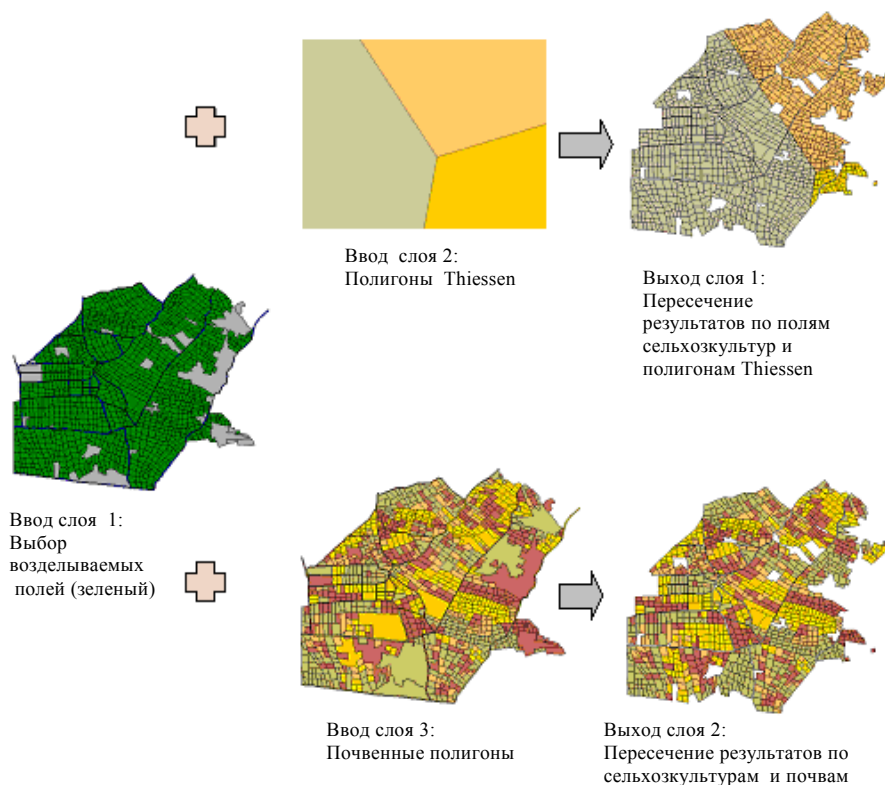


Рис. 7. Вверху: выбранные возделываемые поля, пересекающиеся с полигоном Thiessen, связанным с метео-данными; внизу: почвы, пересекающиеся с возделываемыми полями. Для обеих операций также включена идентификация полей для расчетов

Метеоданные, используемые в этом примере применения программы, относятся к периоду 1970-1999 и состоят из декадных значений осадков, максимальной и минимальной температуры, средней относительной влажности, продолжительности солнечного сияния и скорости ветра. Полигоны возделываемых полей были получены путем оцифровывания и интерпретации спутниковых снимков. Сельхозкультуры, определенные на каждом поле, были получены из сравнения NDVI двух снимков, снятых в разные даты (апрель и август), с использованием автоматизированной на компьютере классификации. Почвенные карты были получены из базы данных НИЦ МКВК.

Как только установлены сельхозкультуры, климатические и почвенные характеристики для каждого возделываемого поля, *Расчетная Таблица (ST)* построена. ST – это таблица *.dbf, связанная с каждым “*Расчетным сценарием*”, и в которой хранятся характеристики всех возделываемых полей на исследуемой площади, относящихся к этому расчетному сценарию. Каждое возделываемое поле представлено в ST строкой, а поля, имеющие последовательность сельхозкультур (озимую и летнюю культуры), представлены двумя строками. ST содержит информацию о сельхозкультурах (дату сева, дату уборки урожая и продолжительность каждой фазы развития), почвах, влажности почвы, способах полива, вариантах полива, метеоданные и периоды ограничения водоподачи. В столбцах ST хранятся по умолчанию значения непространственной базы данных, как указывалось выше, а столбцы, относящиеся к доминантным почвам и метеорологическим станциям, заполняются через ранее описанную процедуру перекрытия ГИС.

Применение ГИС было усовершенствовано инструментарием *Assign Proximity*, который анализирует совместно полигоны и точки и приписывает каждому полигону атрибуты, связанные с ближайшей точкой, т.е. возможность знать для каждого участка местоположение ближайшего водовыпуска. На рис. 8 представлены результаты применения *Assign Proximity*, при котором использовались тематические слои с возделываемыми полями и водовыпусками (проектными). Разные цвета могут представлять в реальности ирригационные сектора.

Интерфейс приложения

Главное окно GISAREG состоит из трех областей (рис. 6): одна для картирования, включая легенду; другая – для расчетной таблицы, описанной выше или для представления результатов в табличном формате; и еще одна – для управления сценариями (внизу справа). В дополнение к командам ArcView имеется по умолчанию несколько контекстных меню, кнопок и инструментариев, которые облегчают ввод данных, построение сценариев и командование операциями расчета и выводом карт. Например, на рис. 9 пользователь создал сценарий “Default” [по умолчанию] и выполнил расче-

ты, относящиеся к 1971-1973 годам. Тот же самый рисунок содержит вверху слева контекстное меню “Simulations options” (варианты моделирования), а вверху справа кнопки и инструментарии для редактирования сценариев и представления карт.

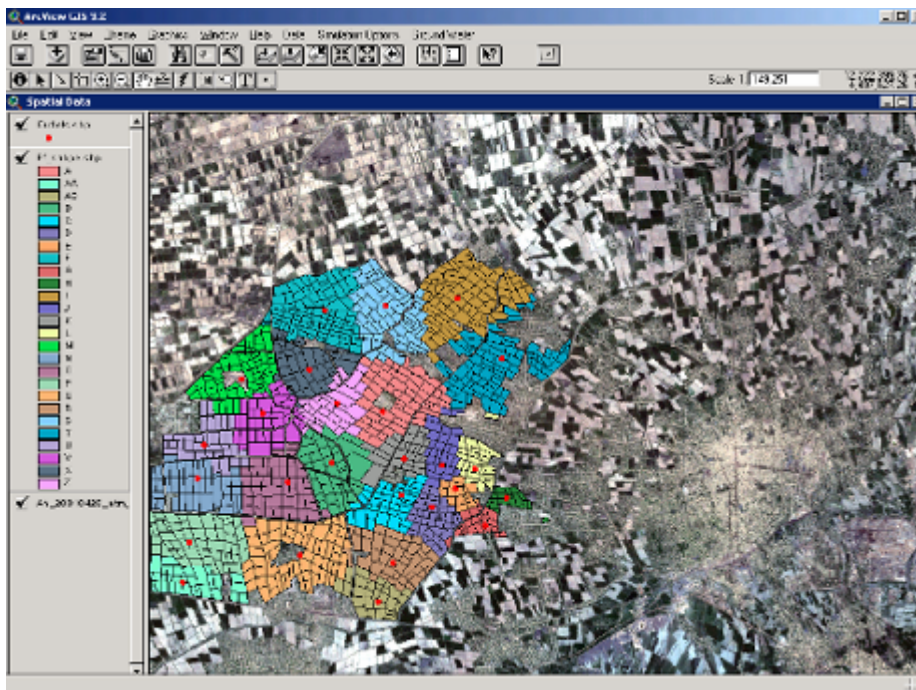


Рис. 8. Результаты применения средств Assign Proximity для идентификации ближайшего водовыпуска

Определение вариантов орошения и ограничений на доступность воды, учитываемых для целей моделирования, достигается через дополнительные окна. Опция расчета графика поливов отсылает к определению порогов влажности почвы, равных или ниже оптимального, найденного при доле истощения почвенной влаги p без водного стресса растений (Allen *et al.*, 1998), и выбору поливных норм. Поливные нормы могут определяться, как объем воды, требуемый для подпитки корнеобитаемой зоны до значения общей доступной почвенной влаги (TAW) или в процентах от TAW, а также выбором фиксированных поливных норм (D) в зависимости от применяемого способа полива. Например, на рис. 10а пользователь создал вариант орошения под кодом “Esq1”, относящийся к фиксированной поливной норме $D = 40$ мм и сроках полива, назначаемых при пороге содержания почвенной влаги в течение четырех фаз развития культуры на 50 % ниже оптимального.

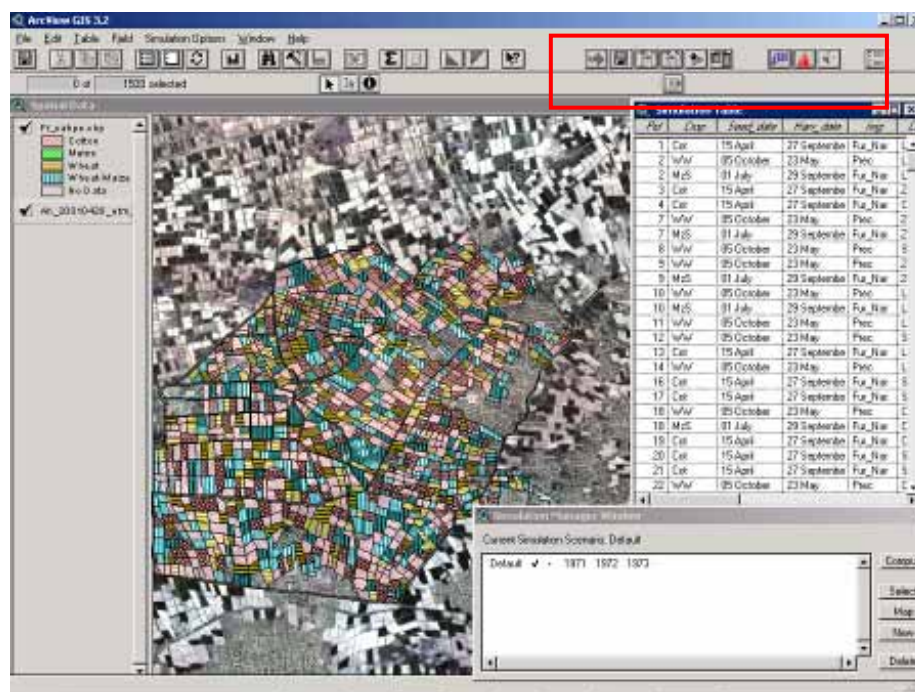


Рис. 9. Основной вид применения GISAREG, включая карту сельхозкультур и соответствующую легенду, расчетную таблицу (ST) и окно управления сценариями (внизу справа). Вверху слева меню опций моделирования и вверху справа – кнопки и инструментари для редактирования сценариев вывода карт

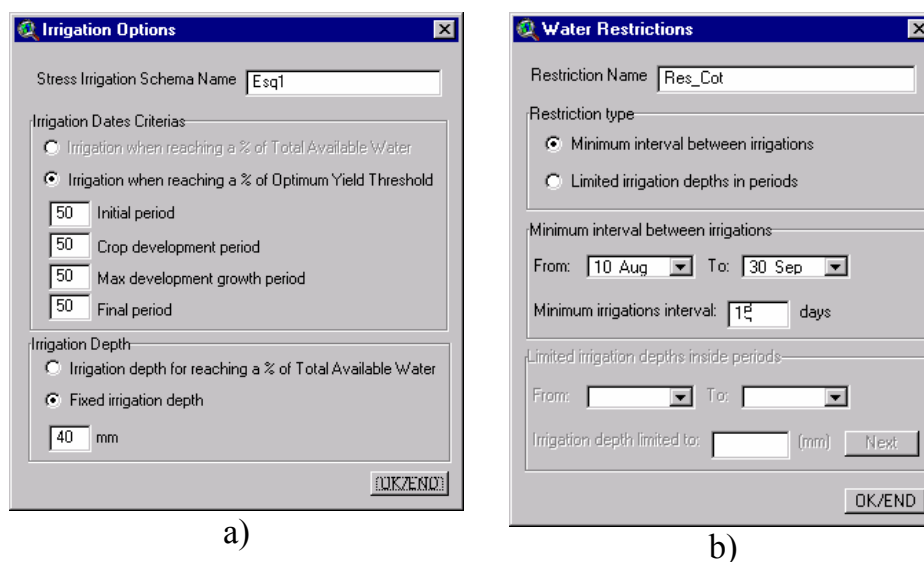


Рис. 10. Формы GISAREG для определения вариантов орошения (a) и ограничений водоподачи (b)

Ограничения водоподачи применяют к выбранным периодам времени и адресованы минимальному интервалу между двумя последовательными поливами или сумме поливных норм, которые могут быть использованы на поливе в течение данного временного промежутка. В примере на рис. 10b ограничение водоподачи под кодом “Res_Cot” предписывает в период от 10 августа до 30 сентября минимальный интервал между поливами 15 суток. Через расчетную таблицу можно назначить разные ограничения водоподачи и графики поливов выбранным полям, системам или возделываемым площадям.

Пользователь может рассчитать сценарий, использующий структуру распределения сельхозкультур, отличную от наблюдаемой, путем редактирования столбца «сгор» ST или через особое окно, как показано на рис. 11. Последнее помогает пользователю произвольно назначать системы сельхозкультур в границах проекта соответственно определенному пользователем проценту покрытия.

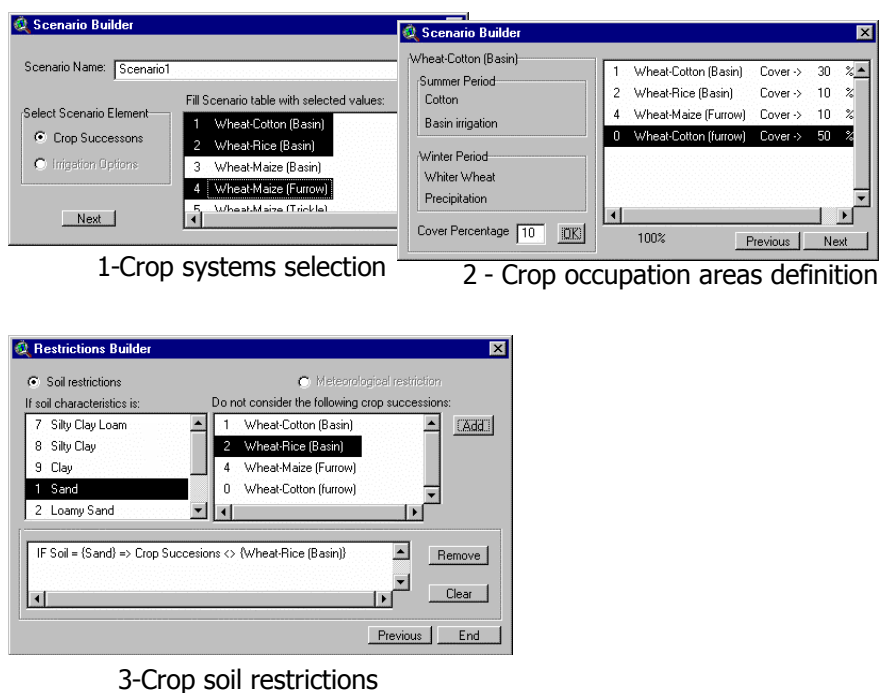


Рис. 11. Окна для создания расчетных сценариев, относящихся к выбору сельхозкультур, проценту почв, покрытых данной сельхозкультурой, и ограничениям, налагаемым на тип почвы относительно данной системы культур

Пространственное распределение систем сельхозкультур может быть подчинено ограничениям на использование некоторого типа почв для данной системы сельхозкультур. Затем создается карта, показывающая пространственное распределение систем сельхозкультур, удовлетворяющая определенному пользователем критерию, который может быть позже введен в ST и будет использован для расчетного сценария. Моделирование многочисленных сценариев позволяет сделать наглядным воздействие назначенных характеристик управления поливами на водопотребление и продуктивность использования воды, способствуя таким образом выбору лучших альтернатив для дальнейшей реализации.

Выходные данные

Выходные данные GISAREG могут быть представлены в табличном, графическом форматах или в виде карт (рис. 12) и могут рассматривать одно поле, поля в выбранной области или общей площади исследований. Кроме того, результаты могут относиться к одной единственной дате, т.е. дефицит почвенной влаги для сельхозкультуры в выбранный день, или ко всему периоду моделирования, т. е. устанавливая требования сельхозкультур на орошение относительно определенного сценария.

Годичные результаты сохраняются в таблице *.dbf, которая имеет то же самое имя, что и расчетный сценарий, следующий за годом расчетов. Для любого расчетного сценария будет столько таблиц результатов (RT), сколько лет моделируется пользователем. Таблицы результатов содержат информацию о: сельхозкультурах, требованиях на орошение, доступной почвенной влаге в начале и в конце оросительного периода, фильтрации, эффективных и неэффективных осадках, подпитке из грунтовых вод, потенциальной и фактической эвапотранспирации, относительных потерях урожая, гидромодуле водоподачи и ежемесячных требованиях на орошение.

Выбирая соответствующую площадь на карте или соответствующие возделываемым полям записи в расчетной таблице, можно рассчитать и показать агрегированные результаты. Приведенный на рис. 13 пример иллюстрирует результаты расчета гидрографа требований на орошение относительно главного узла распределительной системы.

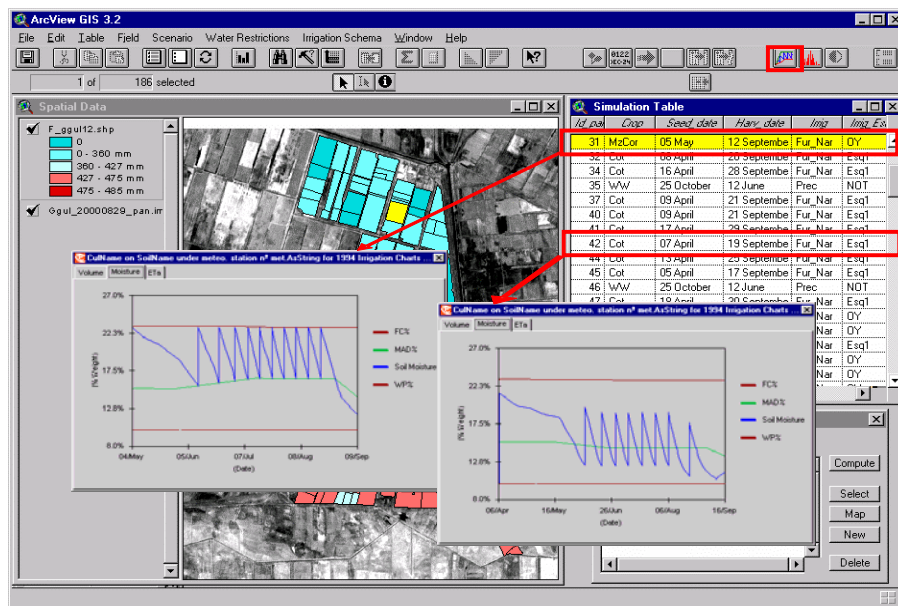


Рис. 12. Результаты расчетов, представленные в виде карты требований на орошение и водно-балансовых диаграмм для двух полей с различными вариантами графика поливов, одним без стресса, другим с водосбережением при контролируемом водном стрессе

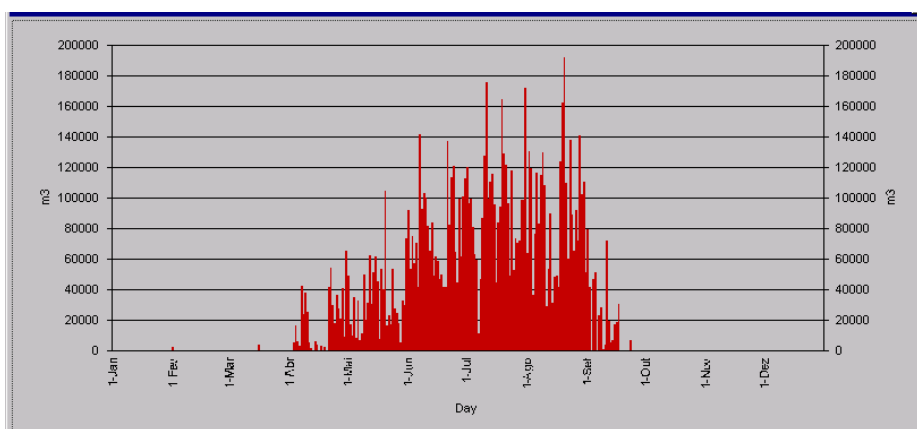


Рис. 13. Гидрограф требований на орошение в течение вегетационного периода для выбранного узла распределительной системы

Библиография

- Чолпанкулов Э.Д., Инченкова О.П., Перейра Л.С., Парадес П., 2005. Тестирование имитационной модели планирования орошения ISAREG для хлопчатника и озимой пшеницы в условиях Центральной Азии (в данной книге).
- 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, 300p.

- Campos, A.A., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., Fabião, M.S., Liu, Y., Li, Y.N., Mao, Z., Dong, B., 2003. Water saving in the Yellow River Basin, China. 1. Irrigation demand scheduling. *Agricultural Engineering International Vol. V* (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Doorenbos, J., Pruitt, W.G., 1977. *Crop Water Requirements*. Irrig. Drain. Paper 24, FAO, Rome, 193 p.
- Fernando, R.M., Pereira, L.S., Liu, Y., 2001. Simulation of capillary rise and deep percolation with ISAREG. In: Wang, M.H., Han, L.J., Lei, T.W., Wang, B.J. (Eds.) *International Conference on Agricultural Science and Technology, Vol. 6: Information Technology for Agriculture*, ICAST, Ministry of Science and Technology, Beijing, China, pp. 447-455.
- Fortes, P.S., Platonov, A.E., Pereira, L.S., 2003. GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. *Agric. Water Manage.* (in press).
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J., Pereira, L.S., 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agric. Water Manage.* 36: 233-246.
- Oweis, T., Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., 2003. Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Near East to cope with water scarcity. 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. 259-272.
- 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.
- Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., Machado, T.G., 2000. KCISA, a program to compute averaged crop coefficients. Application to field grown horticultural crops. In: Ferreira, M.I., Jones, H.G. (Eds.) *Proceedings of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (Estoril, Jun-Jul 1999)*, *Acta Horticulturae* N° 537, ISHS, Leuven, pp. 535-542.
- 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 Bulletin*, 41(2): 29-48.
- Teixeira, J.L., Paulo, A.M., Pereira, L.S., 1996. Simulation of irrigation demand at sector level. *Irrigation and Drainage Systems*, 10: 159-178.
- Zairi, A., El Amami, H., Slatni, A., Pereira, L.S., Rodrigues, P.N., Machado, T., 2003. Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. Rossi, G. Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 181-201.

Глава 7.

ТЕСТИРОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ ISAREG ДЛЯ ХЛОПЧАТНИКА И ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Э.Д. Чолпанкулов¹¹, О.П. Инченкова¹¹, Л.С. Перейра¹², П. Парадес¹²

Реферат: Калибровка и обоснование имитационной модели планирования орошения в условиях Центральной Азии была проведена с использованием полевых наблюдений за хлопчатником в период 1982-1988 гг. в Голодной степи и за хлопчатником и озимой пшеницей в период 2001-2003 гг. в Ферганской долине. Калибровка и обоснование выполнялись путем сравнения наблюдаемых и вычисленных влажностей почвы в период вегетации. Поэтому для местных условий были определены коэффициенты сельхозкультур, а также гидравлические характеристики почвы и фактор истощения почвенной влаги при отсутствии стресса. Были также проверены и обоснованы параметрические уравнения для оценки подпитки с грунтовых вод. Кроме того, положительный результат дало тестирование уравнения эталонной эвапотранспирации Пенмана-Монтейта по сравнению с другими прежде используемыми методами оценки. В итоге работы получена хорошая сходимости прогнозов модели с натурными наблюдениями, что позволяет использовать модель ISAREG для составления и оценки альтернативных режимов орошения, нацеленных на улучшение водопользования в Центральной Азии.

Ключевые слова: хлопчатник, озимая пшеница, коэффициенты сельхозкультур, потребности сельхозкультур на воду, режим орошения.

Введение

Вопросы о водосбережении всегда были достаточно актуальными в странах Центральной Азии. Контроль и учет использования воды осуществлялся в прошлом Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР. С 1992 года пять новых независимых государств инициировали новый про-

¹¹ НИЦ МКВК, Узбекистан, 7000187, Ташкент, Карасу-4, 11 horst_san@mail.ru

¹² Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, E-mail: pparedes@isa.utl.pt; lspereira@isa.utl.pt

цесс совместного использования водных ресурсов рек Амударья и Сырдарья. Это создало новые проблемы рационального использования общих водных ресурсов. Кроме того, имеющиеся методики по определению поливных и оросительных норм не удовлетворяют современным требованиям, так как они были разработаны для года средней водообеспеченности без учета влияния планируемой урожайности, климатических характеристик и метода орошения на потребление и использование воды сельскохозяйственной культурой.

Большие трудности представляет учет и контроль затрат воды по республикам, т. к. основным потребителем водных ресурсов региона – до 92 % – является орошаемое земледелие. Проблемы усложняются, поскольку расчет поливных и оросительных норм в каждой из республик осуществляется по различным методикам, что приводит к неточной оценке фактического положения водообеспеченности региона. Наиболее распространенные подходы основываются на использовании формулы Иванова для расчета эвапотранспирации и вычисления оросительных норм в соответствии с местными климатическими условиями (Шредер и др., 1977; Домуллоджанов, 1983; РДМУ, 1988; КИИВ, 1989).

В последние десятилетия появилось много научно-технических разработок, в частности, относящиеся к информационным технологиям. Таким образом, очень важно разработать единый методический подход и показатели оценки потребностей в оросительной воде для всех государств, расположенных в бассейне Аральского моря и рассмотреть возможности применения и обоснования международно-принятых методик, например, предлагаемых ФАО (Allen *et al.*, 2001). Для этой цели была выбрана модель ISAREG (Teixeira and Pereira, 1992, Liu *et al.* 1998). Эта имитационная модель планирования орошения уже давно используется в некоторых частях мира для расчета потребностей сельхозкультур в орошении с использованием метеорологических данных, оценки текущих графиков поливов, выбора наиболее подходящих режимов орошения культур с учетом планируемой урожайности и/или обеспеченности оросительной водой.

Модель ISAREG позволяет моделировать альтернативные режимы орошения в зависимости от уровней допустимого водного стресса для сельхозкультуры, а также различных условий водообеспеченности. Альтернативные режимы орошения оцениваются в зависимости от относительной потери урожайности при эвапотранспирации сельхозкультурой ниже своего потенциального уровня. Последние примеры успешного применения модели для озимых и летних орошаемых сельхозкультур приводятся в работах Oweis *et al.* (2003) и Zairi *et al.* (2003) по поверхностному орошению в бассейне Средиземного моря и работах Liu *et al.* (2000) и Campos *et al.* (2003) по поверхностному орошению в Северном Китае.

В данной статье представлены основные результаты полевых наблюдений и вычислений, включая определение коэффициентов сельхозкультур, при калибровке и обосновании модели ISAREG в Центральной Азии для

основных орошаемых культур в регионе, а именно хлопчатника и озимой пшеницы.

Модель

Модель ISAREG является имитационной моделью планирования орошения, рассчитывающей баланс почвенной влаги на уровне поля (Fortes *et al.*, 2005). Водный баланс составляется для многослойной почвы. Расчеты ведутся с разным временным шагом в зависимости от наличия метеоданных. Входными для программы служат следующие данные: осадки, эталонная эвапотранспирация, значения общей и легкодоступной почвенной влаги, содержание влаги в почве в момент сева, потенциальный вклад грунтовых вод, коэффициенты сельхозкультур и доли истощения почвенной влаги при отсутствии стресса по стадиям развития сельхозкультур, глубина корневой системы и фактор зависимости «вода-урожай».

Модель вычисляет фактическую эвапотранспирацию (ET_a) из потенциальной эвапотранспирации сельхозкультуры, которая определяется как

$$ET_c = K_c ET_0 \quad [1]$$

соответственно из эталонной эвапотранспирации (ET_0 , мм) и коэффициентов сельхозкультур (K_c). ET_a определяется как функция доступной почвенной влаги в корнеобитаемой зоне, когда истощение ее превышает долю истощения при отсутствии водного стресса растений (p).

Нормы и сроки поливов могут назначаться, исходя из различных целей, и рассчитываться в соответствии с лимитами подачи воды и пороговыми величинами почвенной влаги, задаваемыми пользователем. Влияние водного стресса на урожайность оценивается с помощью модели, предложенной Stewart *et al.* (1977), где относительные потери урожайности зависят от относительного дефицита эвапотранспирации с использованием фактора зависимости «вода-урожай» K_y .

Последняя версия модели в среде Windows WINISAREG описана Pereira *et al.* (2003) и Fortes *et al.* (2005), причем в последней работе также рассматривается версия модели в ГИС - GISAREG. В версии WINISAREG программа параметризации сельхозкультур KCISA (Rodrigues *et al.*, 2000) и программа расчета ET_0 EVAP56 объединены с ISAREG. Сюда также добавлен алгоритм учета влияния засоления на ET_c и урожайность (Campos *et al.*, 2003) и алгоритм расчета подпитки с грунтовых вод (G_c) и фильтрации (Liu *et al.*, 2001), где G_c является функцией уровня залегания грунтовых вод, влагоемкости почвы и ее характеристик, влияющих на капиллярность и ET_c . Фильтрация, возникающая в результате избытка воды в корнеобитаемой зоне, оценивается с помощью параметрического уравнения как функция почвенных характеристик и объема воды сверх полевой влагоемкости (Liu *et al.*, 2001).

Входные данные вводятся вручную с клавиатуры во время прогона или берутся из предварительно определенных файлов ASCII, включая:

- *Метеорологические данные*: осадки, P (мм) и эталонная эвапотранспирация, ET_0 (мм) или метеоданные для расчета ET_0 с применением методики FAO-PM, в частности с недостающими климатическими данными (Allen *et al.*, 2001)
- *Данные по сельхозкультурам*: сроки стадий развития сельхозкультур, коэффициенты сельхозкультур, K_c ; глубина корневой зоны, Z_r (м); доля истощения почвенной влаги при отсутствии водного стресса, p ; фактор влияния дефицита влаги на урожай, K_y
- *Почвенные данные для многослойных почв*: для каждого слоя его глубина, d (м); содержание почвенной влаги при полевой влагоемкости, θ_{FC} (мм мм⁻¹) и в точке завядания θ_{WP} (мм мм⁻¹). Дополнительный файл используется для ввода параметров уравнения по подпитке с грунтовых вод.

При выполнении расчетов в модели предусмотрены условия замерзшей почвы с севом до заморозков или после оттаивания почвы. Начальное содержание почвенной влаги задается пользователем или оценивается моделированием от предшествующего периода, когда большая часть почвенной влаги использована, или во время сезона дождей, когда можно допустить пополнение почвенной влаги. Примеры этих процедур представлены Campos *et al.* (2003).

Модель ISAREG вычисляет капиллярный подъем с уровня грунтовых вод с помощью уравнений, представленных Liu *et al.* (2001). Параметрические уравнения, используемые для расчета подпитки с грунтовых вод G (мм сутки⁻¹), приведены ниже:

$$\begin{aligned}
 G &= G_{\max}(D_w, ET_m) & W < W_s(D_w) \\
 G &= G_{\max}(D_w, ET_m) \left(\frac{W_c(D_w) - W}{W_c(D_w) - W_s(D_w)} \right) & W_s(D_w) \leq W \leq W_c(D_w) \quad [2] \\
 G &= 0 & W > W_c(D_w)
 \end{aligned}$$

где D_w – глубина залегания грунтовых вод; W , W_s и W_c – соответственно фактическая, стабильная и критическая влагоемкость, ET_m – потенциальная или максимальная эвапотранспирация сельхозкультуры, G_{\max} – потенциальная или максимальная G для данного типа почвы и климата.

Функция $G_{\max}(D_w, ET_m)$ задается как

$$G_{\max} = k \cdot ET_m \quad \text{при } D_w \leq D_{wc} \quad [3a]$$

$$G_{\max} = a_4 \cdot D_w - b_4 \quad \text{при } D_w > D_{wc} \quad [3b]$$

где k – эмпирическая константа, зависящая от типа почвы (таблица 1), D_{wc} – критическое значение D_w , определяемое как

$$D_{wc} = a_3 \cdot ET_m + b_3 \quad \text{при } ET_m \leq 4 \text{ мм/сут} \quad [4a]$$

$$D_{wc} = 1,4 \quad \text{при } ET_m > 4 \text{ мм/сут} \quad [4b]$$

Таблица 1. Перечень уравнений, используемых для вычисления потоков грунтовых вод и соответствующих параметров

Уравнение	Условия	Параметры
$W_c = a_1 \cdot D_w^{b_1}$		$a_1 = W_{Fc}$, влагоемкость почвы до глубины 1.0 м при полевой влагоемкости $b_1 = -0,17$
$W_s = a_2 \cdot D_w^{b_2}$		$a_2 = 1,1 (W_{Fc} + W_{wp})/2$, влагоемкость выше среднего между значениями полевой влагоемкости и точкой завядания $b_2 = -0,27$
$D_{wc} = a_3 \cdot ET_m + b_3$	при $ET_m \leq 4 \text{ мм/сут}$	$a_3 = -1,3$ $b_3 = 6,7$ для глинистых почв и пылевато-иловатых суглинков, и снижается до 6,2 для глинистых песков
$D_{wc} = 1,4$	при $ET_m > 4 \text{ мм/сут}$	
$G_{max} = k \cdot ET_m$	при $D_w \leq D_{wc}$	$a_4 = 4,6$ для иловатых и пылевато-иловатых суглинков, снижается до 3 для глинистых песков
$G_{max} = a_4 \cdot D_w^{b_4}$	при $D_w > D_{wc}$	$b_4 = -0,65$ для иловатых суглинков и снижается до $-2,5$ для глинистого песка
$k = 1 - e^{-0,6 \cdot LAI}$	при $ET_m \leq 4 \text{ мм/сут}$	
$k = 38/ET_m$	при $ET_m > 4 \text{ мм/сут}$	

Функция $W_c(D_w)$ задается как

$$W_c = a_1 D_w^{-b_1} \quad [5]$$

а $W_s(D_w)$ определяется как

$$W_s = a_2 \cdot D_w^{b_2} \quad \text{для } D_w \leq 3 \text{ м} \quad [6a]$$

$$W_s = 240 \text{ мм} \quad \text{для } D_w > 3 \text{ м} \quad [6b]$$

Фильтрационные потоки рассчитываются с помощью уравнения спада

$$W = a \cdot t^b \quad [7]$$

где W (мм) – влагоемкость почвы в момент времени t (сут) после сильного дождя или полива; a , b – константы, которые зависят от почвенных характеристик. Параметр a находится между значением влагоемкости почвы в состоянии насыщения и полевой влагоемкостью, а b меньше чем $-0,17$ для быстро высыхающих почв и больше для медленно дренируемых почв.

Для адаптации моделей в условиях Центральной Азии были проведены полевые и модельные исследования, в частности для оценки подпитки с грунтовых вод. С одной стороны, для калибровки модели использовались результаты прошлых наблюдений за период 1982 – 1988 гг., проведенных в совхозе «Фергана» Сырдарьинской области в Голодной степи, Узбекистан (Чолпанкулов и др., 1984, 1986, 1991, 1992; Чолпанкулов и Икрамов, 1995), включая сравнение методов оценки эталонной эвапотранспирации, получение коэффициентов сельхозкультур и доли истощения почвенной влаги при отсутствии стресса. С другой стороны, были организованы полевые эксперименты в Ферганской долине, охватывающие Ферганскую область (хозяйство «Азизбек-1») в Узбекистане и Ошскую область (хозяйства «Сандык» и «Толойкон») в Кыргызстане (Чолпанкулов и Инченкова, 2002, Чолпанкулов и др., 2004), где была выполнена аналогичная калибровка модели.

Материалы и методы

Исследование на примере Голодной степи

Голодная степь расположена на левобережье р. Сырдарьи и представляет обширную впадину, ограниченную на юге Туркестанским хребтом и его отрогом – хребтом Нуратау, а на востоке – отрогами Чаткальского хребта. На западе граница проходит по древнему руслу Арнася, отделяющему Голодную степь от песков Кызылкум. С востока и северо-востока Голодная степь отделяется от Дальверзинской степи и Ташкентского оазиса долиной реки Сырдарьи. Экспериментальный участок располагался в совхозе «Фергана» Сырдарьинской области ($40,2^\circ$ северной широты, $68,6^\circ$ восточной долготы, высота - 332 м).

Климат данного региона континентальный, засушливый и отличается малой облачностью, высокими температурами летом и низкими температурами зимой. Осадки в основном выпадают в зимний период. Абсолютный максимум температуры воздуха приходится на июль (до $+47^\circ\text{C}$), а абсолютный минимум – на декабрь-январь (-34°C). Годовое количество осадков колеблется от 250 до 300 мм, увеличиваясь к горам до 430 мм. Климатические характеристики для вегетационного периода хлопчатника (апрель-сентябрь) за период 1982-88 гг. представлены на рисунках 1 и 2 и в таблице 2.

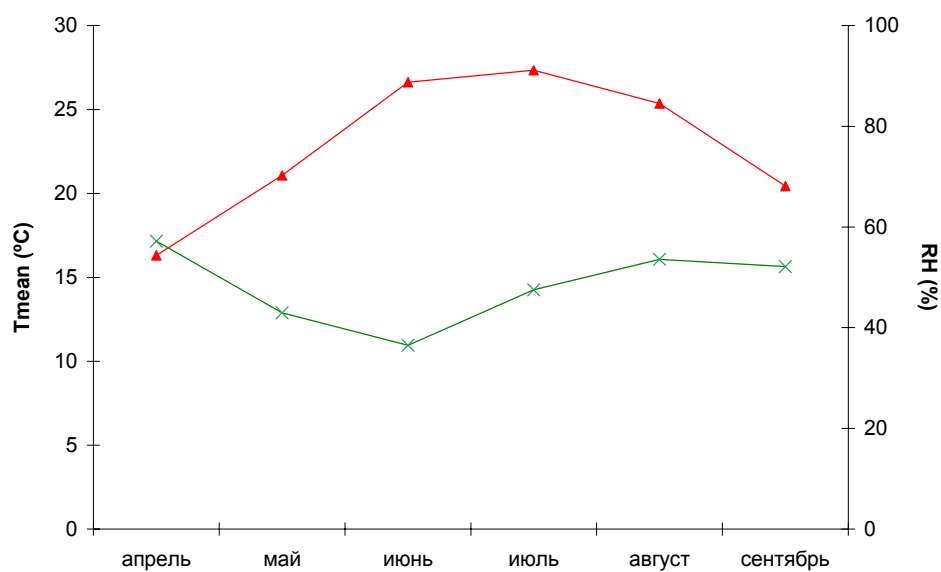


Рис. 1. Голодная степь, 1982-1988 гг.:
среднемесячная температура —▲— и относительная влажность —×—

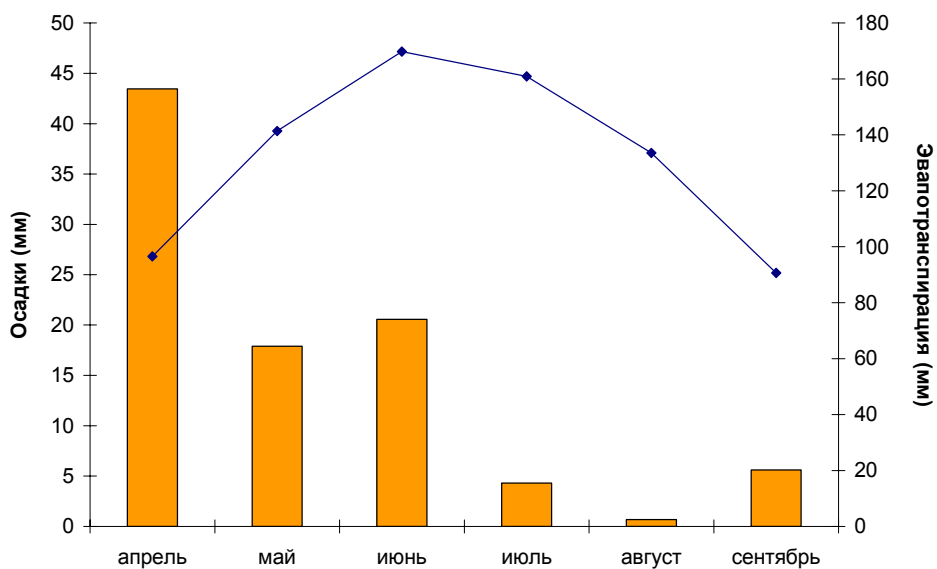


Рис. 2. Голодная степь, 1982-1988 гг.:
Среднемесячное количество осадков (■) и среднемесячная эталонная
эвапотранспирация (ET₀) (—◆—)

Значения ET для хлопчатника были определены из полевых исследований, проведенных в период 1982-1988 гг. (Чолпанкулов и др., 1992) с помощью метода теплового баланса (Anon., 1977), упрощенное уравнение которого можно записать следующим образом:

$$E = CF (R - B - Q) \quad [8]$$

где E – суммарное испарение (мм) или рассчитанный тепловой поток, R – радиационный баланс (кал/см²) или чистая радиация, B – тепловой поток в почву (кал/см²), Q – турбулентный теплообмен (кал/см²) или поток физического тепла, CF – коэффициент пересчета единиц и временного масштаба наблюдений.

Таблица 2. Среднее (\bar{X}) и квадратическое отклонение (s) по основным метеоданным (совхоз “Фергана”, Сырдарья, Голодная степь, 1982-1988)

		апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
T _{сред} [°C]	\bar{X}	16,3	21,1	26,6	27,3	25,4	20,4
	s	1,5	2,4	0,9	1,7	1,4	1,2
RH [%]	\bar{X}	58	43	37	48	54	52
	s	8,8	6,9	5,4	10,2	9,3	10,6
u _z [м с ⁻¹]	\bar{X}	2	2	1,5	1	1	1
	s	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5
n [h]	\bar{X}	7,3	9,4	10,5	10,7	9,8	8,2
	s	1,2	1,9	3,3	4,4	4,2	3,1
ET ₀ [мм сут ⁻¹]	\bar{X}	3	5	6	5	5	3
	s	0,4	0,5	0,7	1,0	1,0	0,5
P [мм]	\bar{X}	44	18	21	4	1	6
	s	34,4	9,7	26,7	6,7	1,8	6,5

Радиационный баланс и тепловой поток в почву замерялись на поле с помощью датчиков, разработанных в Ленинградском агрофизическом институте. Для наблюдений за температурой и влажностью воздуха на высоте 2,0 и 0,5 м, когда (R-B) > 0,2 кал/см² мин, $\Delta T \geq 0,3$ °C ($\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$) и $\Delta e \geq 0,3$ мбар ($\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$), турбулентный теплообмен определяется как:

$$Q = (R-B) \Delta T / (\Delta T + 1.56 \Delta e) \quad [9]$$

или когда вышеуказанное условие не выполняется

$$Q = 1,35 * K * \Delta T \quad [10]$$

где K – коэффициент турбулентности, характеризующий интенсивность вертикального переноса тепла. K задается уравнением

$$K = 0,104 * m * \Delta u \quad [11a]$$

$$K = 0 \quad \text{если } \Delta T < -2,0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ или } \Delta u < 0,3 \text{ м/с} \quad [11b]$$

где Δu – разница между скоростью ветра (м с^{-1}), наблюдаемой на высоте 2,0 и 0,5 м, а m – величина, определяемая числом Ричардсона:

$$m = 1 + 2,6 Ri + \sqrt{(1 + 2,6 Ri)^2 - 1} \quad \text{если } Ri \leq 0 \quad [12a]$$

$$m = 1 + 10,3 Ri - \sqrt{(1 + 10,3 Ri)^2 - 1} \quad \text{если } Ri > 0 \quad [12b]$$

с

$$Ri = - 0,048 \Delta T / (\Delta u)^2 \quad [13]$$

Проводились полевые наблюдения за температурой воздуха (замеряемой на высоте 2 м и 0.5 м), относительной влажностью воздуха (RH) и скоростью ветра (на тех же высотах), а также радиационным балансом, который замерялся на высоте 2 м. Замеры выполнялись каждые 3 часа. На расположенной по близости метеостанции также наблюдались суточная температура и RH для вычисления потенциальной ET по формуле Иванова (Иванов, 1957; Средазгипроводхлопок, 1970):

$$ET_p = 0,0018 (T+25)^2 (100 - RH) \quad [14]$$

где ET_p (мм) – потенциальная эвапотранспирация, T ($^\circ\text{C}$) – среднемесячная температура, RH (%) – среднемесячная влажность воздуха. Суточные наблюдения за потенциальным испарением выполнялись с помощью эвапорометра ГГИ-3000.

Были также выполнены наблюдения за уровнем грунтовых вод и почвенной влажностью, причем последняя определялась до уровня грунтовых вод термостатно-весовым методом. Замеры проводились раз в декаду. Нормы и объемы водоподачи на экспериментальных полях замерялись водосливом Чиполетти.

Гидравлические свойства почв данного района приведены в таблице 3. Различия в характеристиках по годам исследования объясняются проведением экспериментов на разных полях.

Уровни грунтовых вод изучались на полях в период 1983-1988 гг., но данные для 1986 г. и 1988 г. отсутствуют. Из исследований прошлых лет был сделан вывод, что уровни грунтовых вод на участках в Голодной степи во время вегетации хлопчатника в зависимости от числа поливов, обычно

проводимых в данном районе и в меньшей степени от атмосферных осадков, колебались от 1,2 до 3,2 м.

Учитывая гидравлические свойства почв Голодной степи, получены следующие значения для параметров подпитки с грунтовых вод, приведенных в таблице 3 для Голодной степи: $a_1 = 320$; $b_1 = -0,17$; $a_2 = 242$; $b_2 = -0,27$; $a_3 = -1,3$; $b_3 = 6,2$; $a_4 = 4$ и $b_4 = -0,65$. Параметры уравнения фильтрации (7) имеют значения $a = 370$ и $b = -0,01$ и принималось во внимание, что полевая влагоемкость достигалась через 2 дня после обильного поверхностного полива.

Таблица 3. Полевая влагоемкость, точка завядания и общая доступная влага (TAW) почв на экспериментальных участках, 1982-1987 гг., Голодная степь

Годы	θ_{FC} (M^3/M^3)	θ_{WP} (M^3/M^3)	Zr (м)	TAW (мм/м)
1982	0,37	0,13	2,00	240
1983	0,32	0,11	1,50	210
1984	0,30	0,10	1,50	200
1985	0,31	0,8	1,50	230
1986	0,28	0,11	1,20	130
1987	0,31	0,11	1,50	200

Вычисления подпитки с грунтовых вод по модели ISAREG были выполнены для периода 1982-1988 гг. (рис. 3). Исключение составляли расчеты, выполненные для 1982 г. и 1986 г., при которых использовался вариант 2 (уровень грунтовых вод изменяется в течение всего поливного периода), представляющий потенциальную подпитку с грунтовых вод в конкретные сроки (рис. 4).

Enter the parameters for the GW parametric function

Parameters

a1	320
b1	-0.17
a2	242
b2	-0.27
a3	-1.3
b3	6.2
a4	4
b4	-0.65

Deep Percolation
 $W = a \cdot T^b$

a= 370 b= -0.01

T fc= 2 T < T fc

Enter LAI and water table depth

Days	Date	LAI	WT. depth
Ini Date	22-04		1.7
1 st	09-06	0.21	2.3
2 nd	22-06	0.45	1.5
3 rd	06-07	1.54	1.8
4 th	21-07	3.14	2.1
5 th	04-08	3.5	2
6 th	24-08	4.1	1.9
7 th	14-09	3.3	2.6
End Date	30-09	3	3.2

Number of days with available data: 7 Days

Рис. 3. Окно WINISAREG, показывающее параметры, используемые для расчета подпитки и уровней грунтовых вод за 1983 год в Голодной степи

Days	Date	GW mm.d-1
1 st	15-06	2.06 mm/Day
2 nd	10-08	0.40 mm/Day
3 rd		
4 th		
5 th		
6 th		
7 th		
8 th		
9 th		
10 th		

Рис. 4. Окно расчета подпитки с грунтовых вод в Голодной степи за 1986 год по варианту 2 программы WINISAREG

Исследование на примере Ферганской долины

Территорию Ферганской долины делят Узбекистан, Таджикистан и Кыргызстан. Она расположена в юго-западной части обширной горной системы Тянь-Шань. Река Сырдарья делит долину на две части, из которых южная больше по размерам и в ней расположены экспериментальные участки (хозяйства «Азизбек-1», «Сандык» и «Голойкон»). С востока долина окаймлена Ферганским, с юга – Алайским и Туркестанским, с севера – Чаткальским и Кураминским хребтами. Ферганская долина является центром водосбора реки Сырдарья и многочисленных горных рек, питаемых от ледников. Крупные города долины – Фергана, Коканд, Андижан и Наманган в Узбекистане, Ходжент в Таджикистане и Ош в Кыргызстане.

Поверхность долины, особенно ее центральная часть, представляет террасированную равнину с многочисленными конусами выноса. Местоположение двух метеостанций, в зоне влияния которых находятся экспериментальные участки в Узбекистане («Азизбек-1») и Кыргызстане («Сандык» и «Голойкон») показано в таблице 4.

Таблица 4. Расположение метеостанций, данные с которых использовались в Ферганских экспериментах

Метеостанция	Широта	Долгота	Высота над у.м.	Высота анемометра
«Фергана» (Узбекистан)	40.77° N	71.09° E	439	2
«Карасу» (Кыргызстан)	40.3° N	72.48° E	888	10

Абсолютный максимум температуры приходится на июль (до $+35^{\circ}\text{C}$), абсолютный минимум наблюдается в январе (-14°C). Количество осадков изменяется в пределах 90-387 мм. Данные за период 1970-2003 гг. по среднемесячным максимальным и минимальным температурам и относительной влажности, среднемесячным количеством осадков и среднемесячной эталонной эвапотранспирации по метеостанции Фергана показаны на рис. 5 и 6.

По метеостанции «Карасу» эти метеорологические переменные показаны на рис. 7 и 8 за периоды 1959-91 и 2001-03 гг. Среднее и квадратическое отклонение этих климатических переменных приведено в таблицах 5 и 6.

Из анализа рисунков 7 и 8 можно сделать вывод, что климатические переменные имеют одну и ту же форму. За исключением осадков, которые намного выше среднего в апреле и декабре в период 2001-2003 гг. (рис. 8).

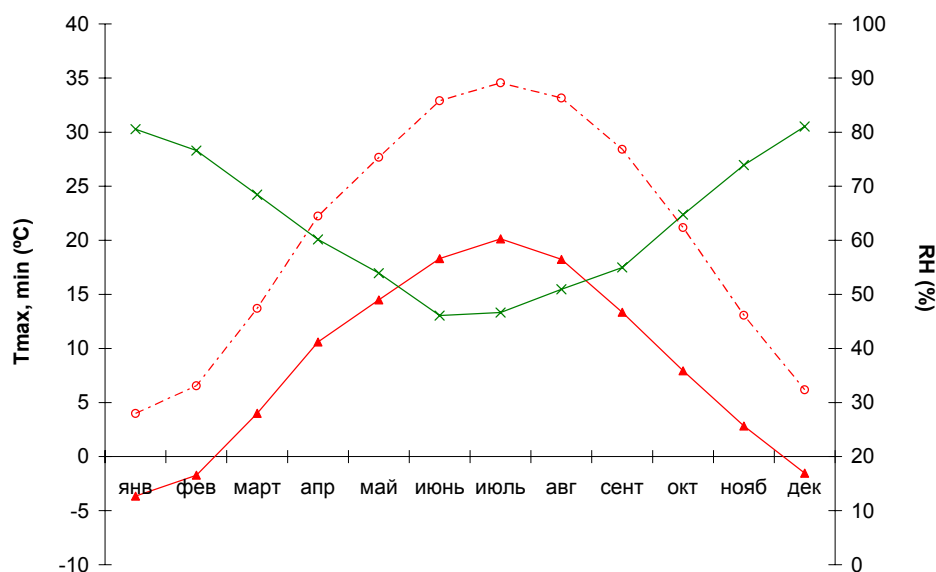


Рис. 5. Среднемесячные минимальные ▲ и максимальные ⊖ температуры и относительная влажность ×, полученные с метеостанции «Фергана» (1970-2003)

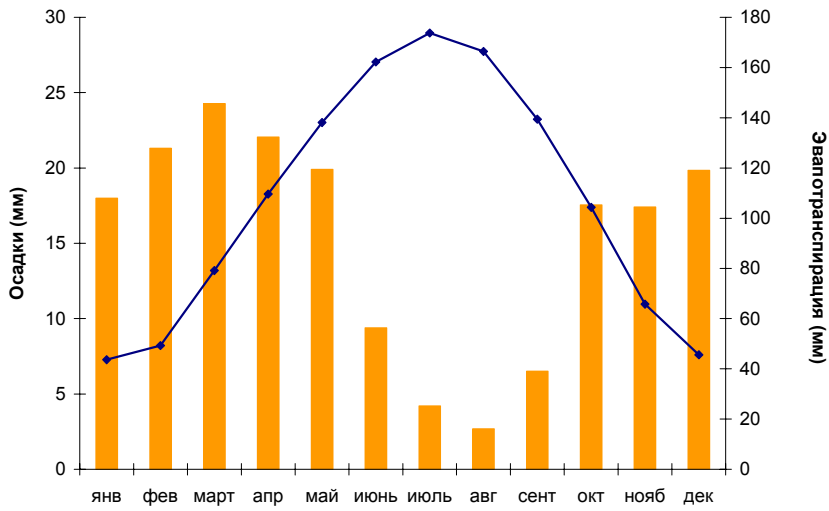


Рис. 6. Среднемесячные осадки (■) и среднемесячная эталонная эвапотранспирация (ET₀) (—◆—), полученные с метеостанции «Фергана» (1970-2003)

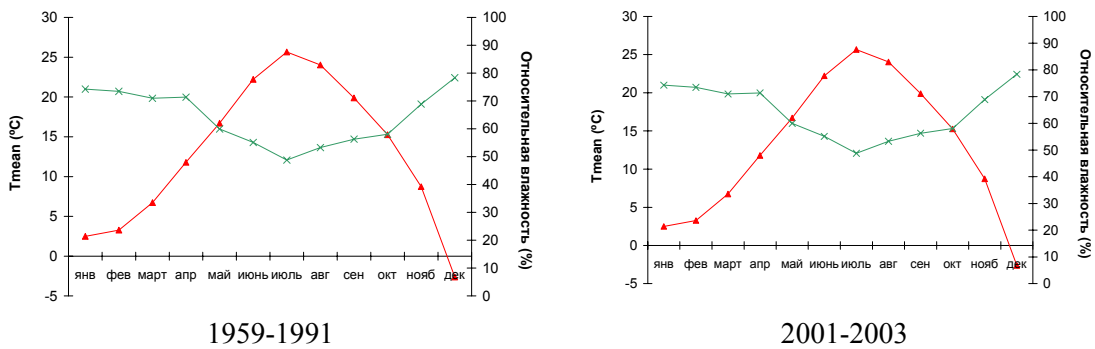


Рис. 7. Среднемесячная температура —▲— и относительная влажность —×— по метеостанции «Карасу»

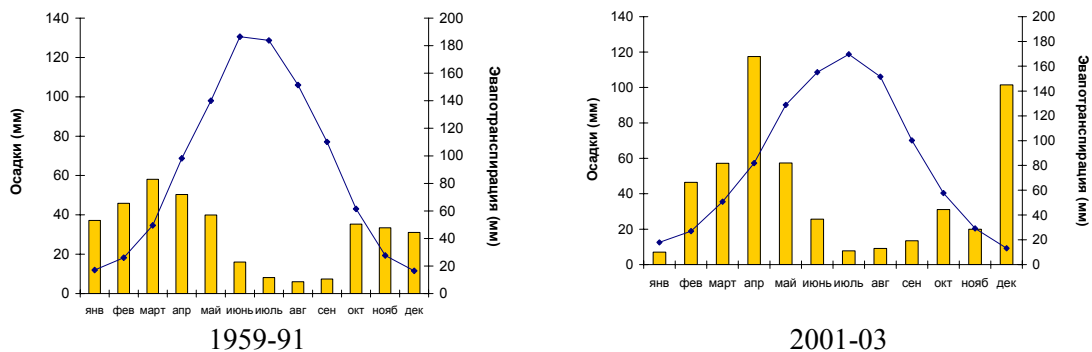


Рис. 8. Среднемесячные осадки (■) и среднемесячная эталонная эвапотранспирация (ET₀) (—◆—) по метеостанции «Карасу»

Таблица 5. Среднее (\bar{X}) и квадратическое отклонение (-я) последовательности метеоданных по метеостанции «Фергана» (1970-2003)

		янв	фев	март	апр	май	июнь	июль	авг	сент	окт	нояб	дек
T_{\min} [°C]	\bar{X}	-3,7	-1,7	4,0	10,6	14,5	18,3	20,1	18,2	13,3	7,9	2,8	-1,5
	s	3,1	3,9	2,9	2,3	2,0	1,6	1,3	1,7	1,9	2,4	2,8	3,1
T_{\max} [°C]	\bar{X}	4,0	6,6	13,7	22,3	27,7	32,9	34,6	33,1	28,4	21,2	13,1	6,2
	s	3,1	4,7	4,1	3,5	3,1	2,2	1,9	1,9	3,0	3,3	4,2	3,7
RH [%]	\bar{X}	81	77	68	60	54	46	47	51	55	65	74	81
	s	5,4	6,5	8,0	8,7	7,6	5,9	5,2	4,3	5,7	7,2	8,6	6,4
u_z [м с ⁻¹]	\bar{X}	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0
	s	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
n [h]	\bar{X}	3	4	5	7	9	11	11	11	9	7	5	3
	s	1,5	1,8	1,8	1,9	1,6	1,3	1,1	1,1	1,3	1,5	1,8	1,5
ET _o [мм сут. ⁻¹]	\bar{X}	1,4	1,7	2,5	3,7	4,5	5,5	5,7	5,4	4,7	3,4	2,2	1,5
	s	0,3	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3
P [мм]	\bar{X}	18	21	24	22	20	9	4	3	6	18	17	20
	s	12,2	17,2	12,8	19,2	16,6	9,4	3,8	3,6	7,8	28,4	17,3	15,5

Таблица 6. Среднее (\bar{X}) и квадратическое отклонение (-я) последовательности метеоданных по метеостанции «Карасу» (1959-91 и 2001-2003)

		янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сент	окт	нояб	дек	
T_{mean} [°C]	59-91	\bar{X}	-2,6	-0,4	6,3	14,2	18,9	23,8	25,3	23,1	18,6	12,3	5,5	0,2
		s	2,7	3,5	1,9	1,4	1,4	1,1	1,1	0,9	0,8	1,4	2,0	2,6
	01-03	\bar{X}	2,5	3,3	6,7	12,5	17,7	22,9	25,5	24,1	19,7	16,2	8,7	-2,6
		s	1,9	1,8	5,1	4,4	4,2	2,6	2,0	2,1	2,7	3,6	3,8	4,2
RH [%]	59-91	\bar{X}	74	75	72	61	54	44	46	53	52	59	71	77
		s	4,6	4,3	6,8	8,2	7,4	6,2	6,2	5,6	5,4	7,9	8,5	6,1
	01-03	\bar{X}	74	73	71	69	59	53	49	54	54	59	69	78
		s	13,1	9,9	11,7	12,7	11,1	10,0	5,0	6,9	9,7	12,2	13,8	13,7
ET _o [мм сут. ⁻¹]	59-91	\bar{X}	1	1	2	3	5	6	6	5	4	2	1	1
		s	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
	01-03	\bar{X}	1	1	2	3	4	5	5	5	3	2	1	0
		s	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	0,8	0,6	0,6	0,5	0,7	0,4	0,2
P [мм]	59-91	\bar{X}	37	46	58	50	40	16	8	6	7	35	33	31
		s	23,0	21,8	33,8	29,4	25,3	11,5	11,7	8,1	9,5	41,0	21,3	23,9
	01-03	\bar{X}	7	47	57	117	57	26	8	9	14	31	20	102
		s	0,5	3,2	4,7	28,2	14,7	10,1	2,3	3,5	7,0	3,7	2,0	4,4

Почвы в Ферганской долине представлены в основном суглинистыми почвами и тяжелым суглинком. Гидравлические свойства почвы были определены по каждой территории (таблица 7). Эта данные были получены из почвенной съемки и с помощью лабораторных методов для полного диапазона давления почвенной влаги. Глубина почвенного слоя изменялась от 1 до 1,5 м.

Таблица 7. Гидравлические свойства почвы по общей доступной почвенной влаге (TAW) для экспериментальных участков в Ферганской долине

Местоположение участка	Глубина (м)	θ_{FC} ($\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$)	θ_{WP} ($\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$)	TAW (мм/м)	
	0-0,35	0,37	0,2		
Хоз-во «Азизбек-1»	Хлопчатник (поле #13)	0,35-0,50	0,32	0,19	155
		0,50-0,76	0,35	0,19	
		0,76-1,30	0,35	0,2	
Хоз-во «Сандык»	Хлопок (поле #5)	0-1,10	0,30	0,09	210
	Озимая пшеница	0-1,50	0,33	0,08	250
Хоз-во «Сандык»		0-1,00	0,27	0,07	270
Хоз-во «Толойкон»		0-1,00	0,28	0,06	220

Наблюдения за почвенной влажностью проводились между поливами, а также до и после поливов. Для первого слоя мощностью 20 см применялся гравиметрический метод, а для остальных почвенных слоев использовался нейтронный влагомер. Так как в хозяйстве «Азизбек-1» рассматриваемая глубина почвы составляла 130 см с 4 слоями, то замеры производились на глубине 27,5, 42,5, 67,5 и 112,5 см. На поле с хлопчатником в хозяйстве «Сандык» наблюдения выполнялись на глубине 35, 50, 70 и 90 см; рассматриваемая глубина почвы составляла 100 см с учетом только одного однородного слоя. На поле под озимой пшеницей в хозяйстве «Толойкон» замеры выполнялись с помощью нейтронного влагомера на глубине 25, 40, 60, 90 и 100 см.

Вследствие участия грунтовых вод в обеспечении требований сельхозкультур на воду, исследования, проводимые в хозяйстве «Азизбек-1» в период 2001-2003 гг., включали наблюдения за уровнем грунтовых вод, который колебался в пределах 0,84-2,62 м. Уровень грунтовых вод замерялся каждую неделю, а наблюдения за развитием растений проводились дважды в месяц по каждой стадии развития. Уравнения, используемые для расчета подпитки с грунтовых вод и фильтрации (уравнения 2-7) на основе наблюдений, приведены в таблице 8.

Таблица 8. Перечень параметров для расчета капиллярного подъема и фильтрации в хоз-ве «Азизбек-1», Ферганская область

Параметризованные уравнения для расчета подпитки с грунтовых вод	
$W_c = 360 \cdot D_w^{-0.172}$	
$W_s = 305 \cdot D_w^{-0.2705}$	
$D_{wc} = -1.3 \cdot ET_m + 6.6$	при $ET_m \leq 4 \text{ мм/сут}$
$D_{wc} = 1.4$	при $ET_m > 4 \text{ мм/сут}$
$G_{max} = k \cdot ET_m$	при $D_w \leq D_{wc}$
$G_{max} = 4.597 \cdot D_w^{-0.6511}$	при $D_w > D_{wc}$
$k = 1 - e^{-0.6 \cdot LAI}$	при $ET_m \leq 4 \text{ мм/сут}$
$k = 38/ET_m$	при $ET_m > 4 \text{ мм/сут}$
Параметризованное уравнение фильтрации	
$W = 390 \cdot t^{-0.0173}$	

Принимая во внимание гидравлические свойства почв в хозяйстве «Азизбек-1», значения, рассматриваемые для параметров подпитки с грунтовых вод, приведенных в таблице 8 для Ферганской области будут следующими: $a_1 = 360$; $b_1 = -0,17$; $a_2 = 305$; $b_2 = -0,27$; $a_3 = -1,5$; $b_3 = 6,6$; $a_4 = 4,6$; $b_4 = -0,65$. Параметры уравнения фильтрации (7) равны $a = 390$ и $b = -0,02$ и принималось, что полевая влагоемкость достигалась через 5 дней после обильных поливов.

Калибровка модели для хлопчатника в Голодной степи

Эталонная эвапотранспирация

Значения месячной эталонной эвапотранспирации, вычисленной по методике ФАО Пенмана-Монтейта (Allen *et al.*, 2001) с помощью модели EVAP56 за период 1984-1986 (нет данных за 1982 и 1983 гг.) сравнивались с данными, полученными с испарителя ГГИ-3000 в период роста хлопчатника, т.е. с апреля по сентябрь 1984-1986 гг. (рис. 9). Результаты показывают, что коэффициент испарителя приближается к 1,0 (0,99), но данные разбросаны вокруг линии регрессии ($R^2 = 0,69$).

Потенциальная эвапотранспирация была ранее рассчитана по методу Иванова (уравнение 2). Результаты сопоставления обоих методов представлены на рис. 10. Результаты показывают, что коэффициент регрессии намного больше 1, т.е. отмечается большая разница с прежде использованными методами. Причины этого не могли быть определены.

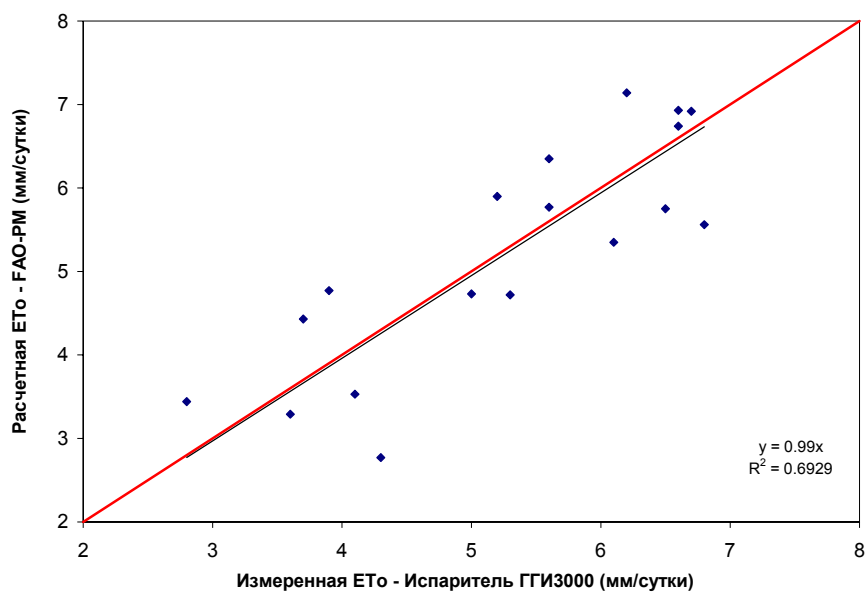


Рис. 9. Сопоставление наблюдаемых (испаритель ГГИ-3000) и расчетных (FAO-PM) значений месячной эталонной эвапотранспирации для Голодной степи, 1984-1986)

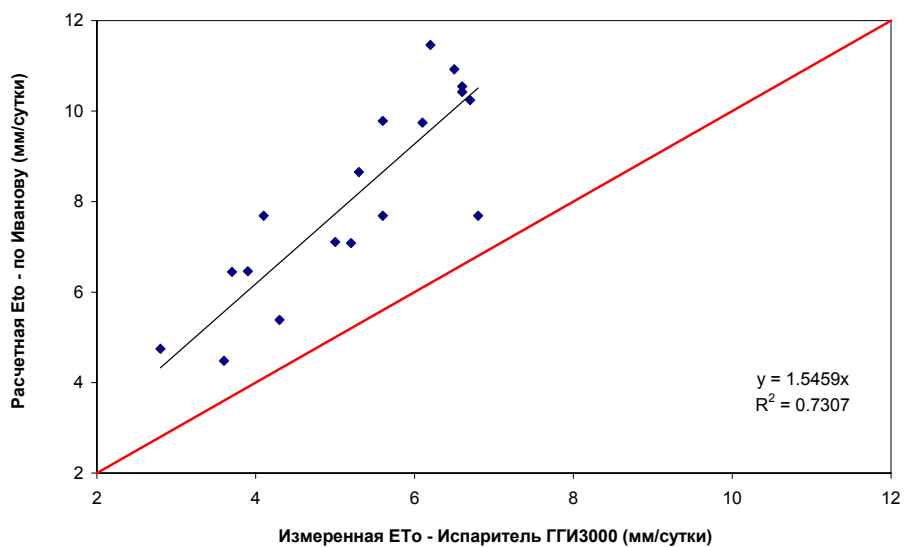


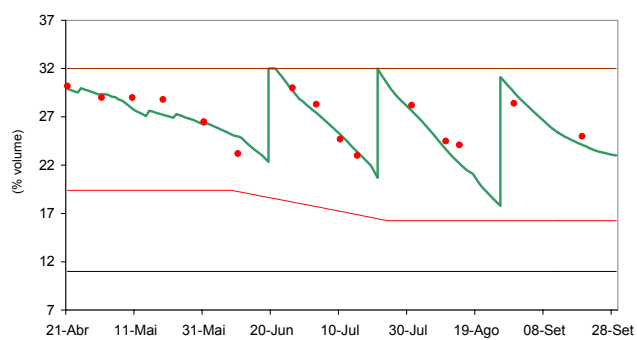
Рис. 10. Сопоставление наблюдаемой (испаритель ГГИ-3000) и вычисленной по методу Иванова потенциальной эвапотранспирации (месячные значения, Голодная степь, 1984-1986)

Содержание почвенной влаги

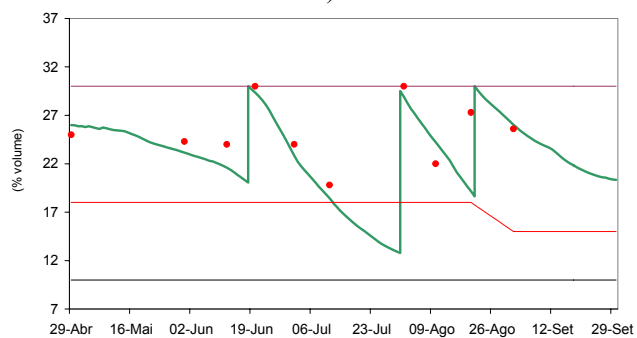
При калибровке/проверке модели ISAREG для условий центральноазиатского региона были использованы данные полевых наблюдений по совхозу «Фергана» Сырдарьинской области за 1983-1988 гг. Использованные для калибровки данные включали метеоданные для расчета ET_0 , как указывалось выше, уровни грунтовых вод для оценки подпитки с грунтовых вод и почвенную влажность для сравнения с расчетными значениями. Калибровка включала уточнение значений K_c и p для обеспечения наилучшей сходимости с наблюдаемыми значениями почвенной влажности. Поливные нормы, соответствующие смоделированным экспериментам, приведены в таблице 9. Результаты сравнения расчетной и наблюдаемой почвенной влажности за 1983-1987 представлены на рис. 11.

Таблица 9. Режимы орошения и оросительные нормы (мм), использованные для расчета почвенной влажности, Голодная степь (1982-1987)

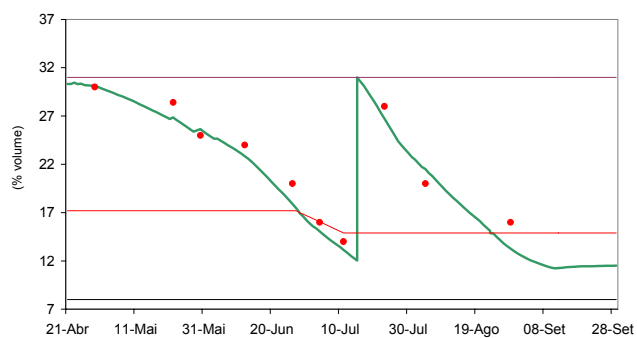
Год	Сроки	Поливы после сева (мм)	Оросительная норма (мм)
1982	1 июль	260	520
	6 август	260	
1983	20 июнь	230	630
	22 июль	200	
	27 август	200	
1984	18 июнь	161	630
	31 июль	250	
	21 август	219	
1985	16 июль	310	310
1986	3 июнь	62	432
	3 июль	200	
	11 август	170	
1987	14 июль	220	400
	30 август	180	



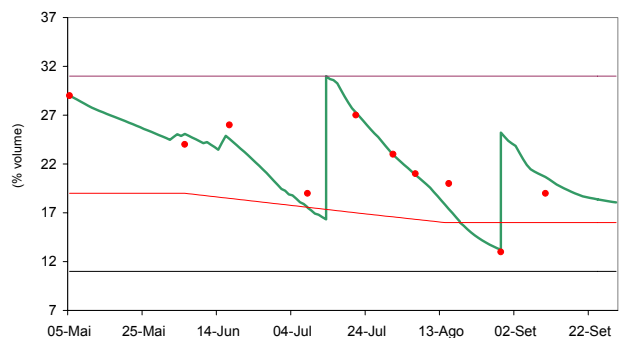
а)



б)



в)



г)

Рис. 11. Расчетные (—) и наблюдаемые (•) значения почвенной влажности (Голодная степь, хлопчатник):
а) 1983; б) 1984; в) 1985; г) 1987

Результаты показывают хорошую сходимость за период 1982-1987 гг.; тем самым показывая, что модель ISAREG правильно прогнозирует почвенную влажность в вегетационный период в Голодной степи, когда принимаются значения K_c и p из таблицы 11. Кроме того, был также принят фактор сезонной зависимости урожайности $K_y = 0,85$. Сходимость наблюдаемых и расчетных величин почвенной влажности приводится на рис. 12, который показывает коэффициент регрессии, близкий к 1,0 и высокий коэффициент смешанной корреляции.

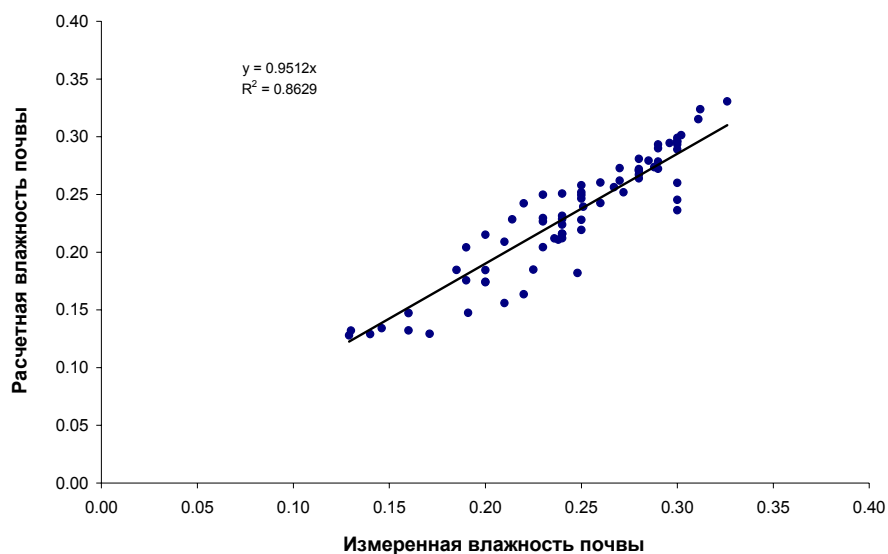


Рис. 12. Сопоставление наблюдаемой и расчетной почвенной влажности (Голодная степь, 1982-1987).

Эвапотранспирация сельхозкультур

Помимо сравнения почвенной влажности также проводилось сравнение фактического значения ET хлопка, рассчитанных по ISAREG, с наблюдаемыми, полученными по методу теплового баланса. Графическое сопоставление приведено на рис. 13.

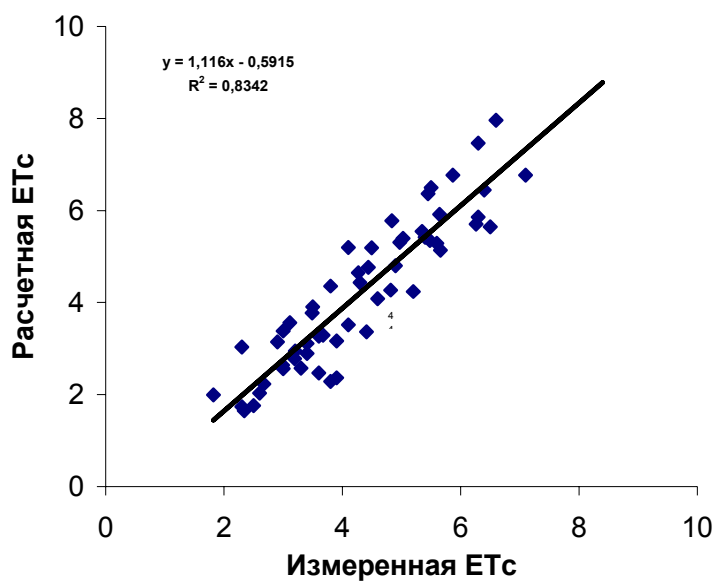


Рис. 13. Наблюдаемые и рассчитанные значения эвапотранспирации (мм/сутки) сельхозкультуры (Голодная степь, 1982-1988).

Результаты на рис. 13 показывают очень хорошую сходимость между наблюдаемыми и рассчитанными значениями, при коэффициенте регрессии, близком к 1,0 и высоком коэффициенте смешанной корреляции.

Наблюдаемые и рассчитанные по программе ISAREG значения сезонной эвапотранспирации хлопка для Голодной степи представлены в таблице 10. Различия обычно небольшие, от 0,5 до 12 %.

Таблица 10. Сопоставление замеренных (метод теплового баланса) и рассчитанных по ISAREG значений эвапотранспирации хлопчатника (Голодная степь, 1983-1987)

ET _{cot} (мм)	1983	1984	1985	1986	1987
Наблюдаемые	730	670	685	721	701
ISAREG	678	755	694	748	688
Разница (%)	7	12	1	4	2

Таблица 11 представляет параметры сельхозкультуры, относящиеся к вышеупомянутому тестированию модели.

Таблица 11. Откалиброванные стадии роста хлопчатника, коэффициенты сельхозкультуры (K_c) и доли истощения при отсутствии стресса (Голодная степь, 1982–1987)

Параметры	Начальная	Развитие	Сер. сезона	Конец сезона
1982				
Период (сроки)	1/04 – 14/04	15/04 – 24/05	25/05 – 19/08	20/08 – 15/09
Коэф-ты сельхозкультуры, K_c	0,4	0,42-1,08	1,08	1,08-0,8
Доля истощения, p	0,99	0,6	0,62	0,74
1983				
Период (сроки)	22/04 – 8/06	9/06 – 9/07	10/07 – 6/09	7/09 – 30/09
Коэф-ты сельхозкультуры, K_c	0,5	0,5-1	1	1-0,25
Доля истощения, p	0,6	0,7	0,75	0,75
1984				
Период (сроки)	29/04 – 5/06	6/06 – 25/06	26/06 – 31/08	1/09 – 30/09
Коэф-ты сельхозкультуры, K_c	0,35	0,35-1,2	1,2	1,2-0,6
Доля истощения, p	0,6	0,6	0,6	0,75
1985				
Период (сроки)	22/04 – 9/06	10/06 – 27/06	28/06 – 24/08	25/08 – 30/09
Коэф-ты сельхозкультуры, K_c	0,55	0,55-1,05	1,05	1,05-0,25
Доля истощения, p	0,6	0,6	0,6	0,7
1986				
Период (сроки)	1/04 – 16/04	17/04 – 14/06	15/06 – 31/08	1/09 – 20/09
Коэф-ты сельхозкультуры, K_c	0,55	0,55-1,1	1,1	1,1-0,4
Доля истощения, p	0,6	0,7	0,7	0,73
1987				
Период (сроки)	6/05 – 5/06	6/06 – 21/07	22/07 – 31/08	1/09 – 30/09
Коэф-ты сельхозкультуры, K_c	0,45	0,45-1,1	1,1	1,1-0,4
Доля истощения, p	0,6	0,7	0,75	0,75

$K_{c\ ini}$ относительно высокое, поскольку всегда до посева требовались обильные поливы. $K_{c\ mid}$ обычно ниже значений, рекомендованных Allen *et al.* (2001), а $K_{c\ end}$ находятся в диапазоне, рекомендованной авторами. Доля истощения p в целом выше значений, предложенных Allen *et al.* (2001).

Калибровка модели для хлопчатника и пшеницы в Ферганской долине

Эталонная эвапотранспирация

Эталонная эвапотранспирация ET_0 вычислялась по методу ФАО Пенмана-Монтейта (ПМ) на базе подекадных значений по Фергане за период 1970-2003 гг. и суточных значений за период 2001-2003 гг. Для м/с «Карасу» в Ошской области суточные значения определялись для периода 2001-2003 гг. Для расчета эталонной эвапотранспирации по модели EVAP56 в этих районах использовались следующие климатические параметры: максимальные и минимальные температуры ($^{\circ}C$), скорость ветра (м/м), факти-

ческое время солнечного сияния (час) и средняя относительная влажность воздуха (%). По Фергане данные относятся к вегетационному периоду хлопчатника, т. е. с апреля по ноябрь. Результаты сравнения ET_o (ФАО ПМ) с наблюдаемыми значениями по испарителю ГГИ-3000 показаны на рис. 14 и 15.

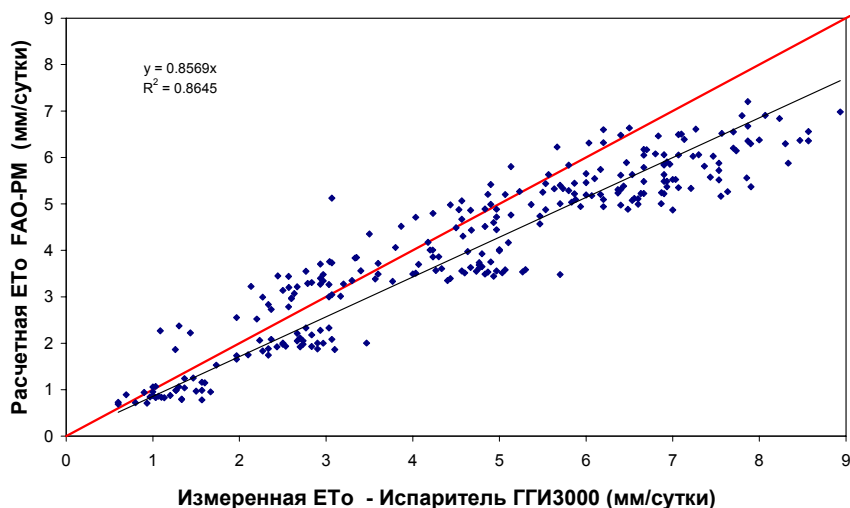


Рис. 14. Сравнение наблюдаемых средних декадных значений (испаритель ГГИ-3000) и расчетных значений (ФАО-ПМ) эталонной эвапотранспирации (мм сут^{-1}) по м/с «Фергана», 1970-2003

Из рис. 14 и 15 можно сделать вывод, что наблюдаемые по испарителю ГГИ-3000 значения могут быть преобразованы в эталонную эвапотранспирацию по ФАО-ПМ с помощью коэффициента испарителя 0,856-0,806.

Месячные значения эталонной эвапотранспирации по ФАО-ПМ также сравнивались с ET , определенной по уравнению Иванова (рис. 16). Для преобразования последней величины в ET ФАО-ПМ требуется коэффициент преобразования равный 0,70.

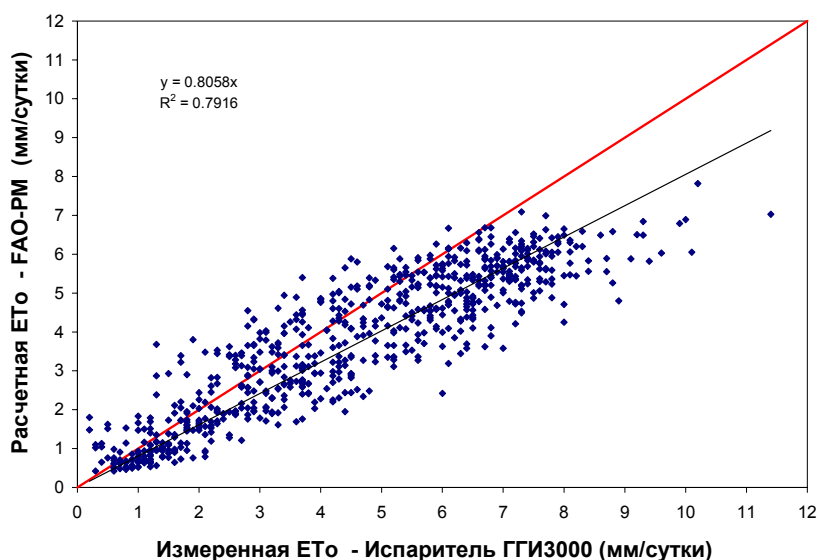


Рис. 15. Сравнение замеренных по испарителю ГГИ-3000 и рассчитанных по FAO-PM суточных значений эталонной эвапотранспирации (мм/сутки) в Ферганской области (2001-2003)

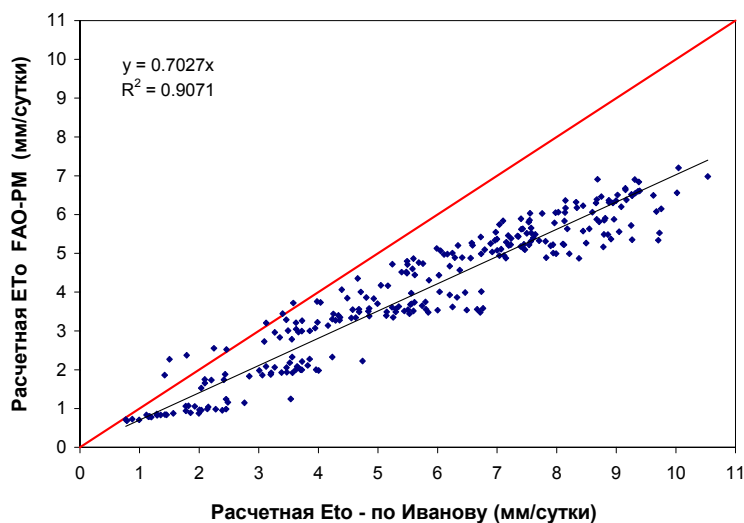


Рис. 16. Сравнение значений эталонной эвапотранспирации (мм/сутки), полученных по методу FAO-PM, и ET, рассчитанных по формуле Иванова, для Ферганской области за период 1970-2003 (апрель-ноябрь)

В Ошской области эталонная эвапотранспирация была вычислена для вегетационных периодов хлопчатника и озимой пшеницы, соответственно в периоды времени сентябрь 2001 - август 2002 и апрель - октябрь 2003. Сравнение наблюдаемых по испарителю ГГИ-3000 и рассчитанных (FAO-PM) значений ETo приведено на рис. 17. Эти результаты показывают, что коэффициент испарителя в данном случае равен 0,602, т. е. намного ниже,

чем для Ферганы, что может быть следствием условий расположения эвапорометра.

Месячные значения эталонной эвапотранспирации ФАО-ПМ были также сопоставлены с ЕТр по формуле Иванова (рис. 18). Для преобразования последних значений в ЕТ ФАО-ПМ требуется коэффициент пересчета 0,76, который равен коэффициенту для Ферганы.

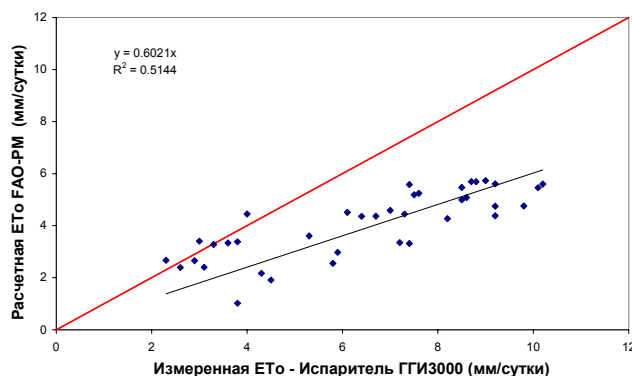


Рис. 17. Сравнение наблюдаемых (испаритель ГГИ-3000) и расчетных значений (ФАО-ПМ) эталонной эвапотранспирации (мм/сутки) для Ошской области, 2001-2003

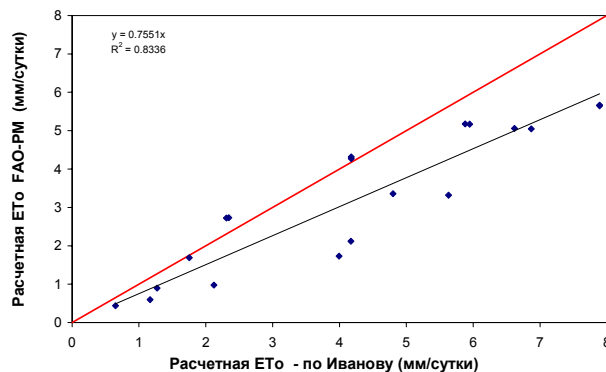


Рис. 18. Сравнение значений эталонной эвапотранспирации (мм/сутки), полученных по методу ФАО-ПМ, и ЕТ, рассчитанных по формуле Иванова для Ошской области за период 2001-2003

Хлопчатник

Обоснование модели ISAREG для хлопчатника было выполнено путем сравнения расчетных и наблюдаемых значений почвенной влажности. Общая поливная норма, используемая для каждого расчета, соответствовала фактическим условиям (таблица 12). Результаты расчетов показаны на рис. 19.

Для вычисления коэффициентов сельхозкультуры для хлопчатника по Ферганской области использовались климатические данные за период 2001-2003 гг.; при этом использовались суточные данные. Для Ошской области использовались суточные климатические данные за 2003 г. Полученные величины представлены в таблице 13.

Таблица 12. Режимы орошения и оросительная норма

Экспериментальное хозяйство	Сроки	Поливные нормы (мм)	Сумма (мм)
«Азизбек-1» (поле #13)	8 июнь	119	865
	4 июль	202	
	17 июль	113	
	30 июль	155	
	14 август	183	
	16 сентябрь	93	
«Азизбек-1» (поле #5)	2 июнь	127	621
	25 июнь	174	
	11 июль	123	
	25 июль	111	
	7 август	86	
«Сандык»	24 июнь	177	427
	13 июль	78	
	27 июль	58	
	9 август	14	
	12 август	100	

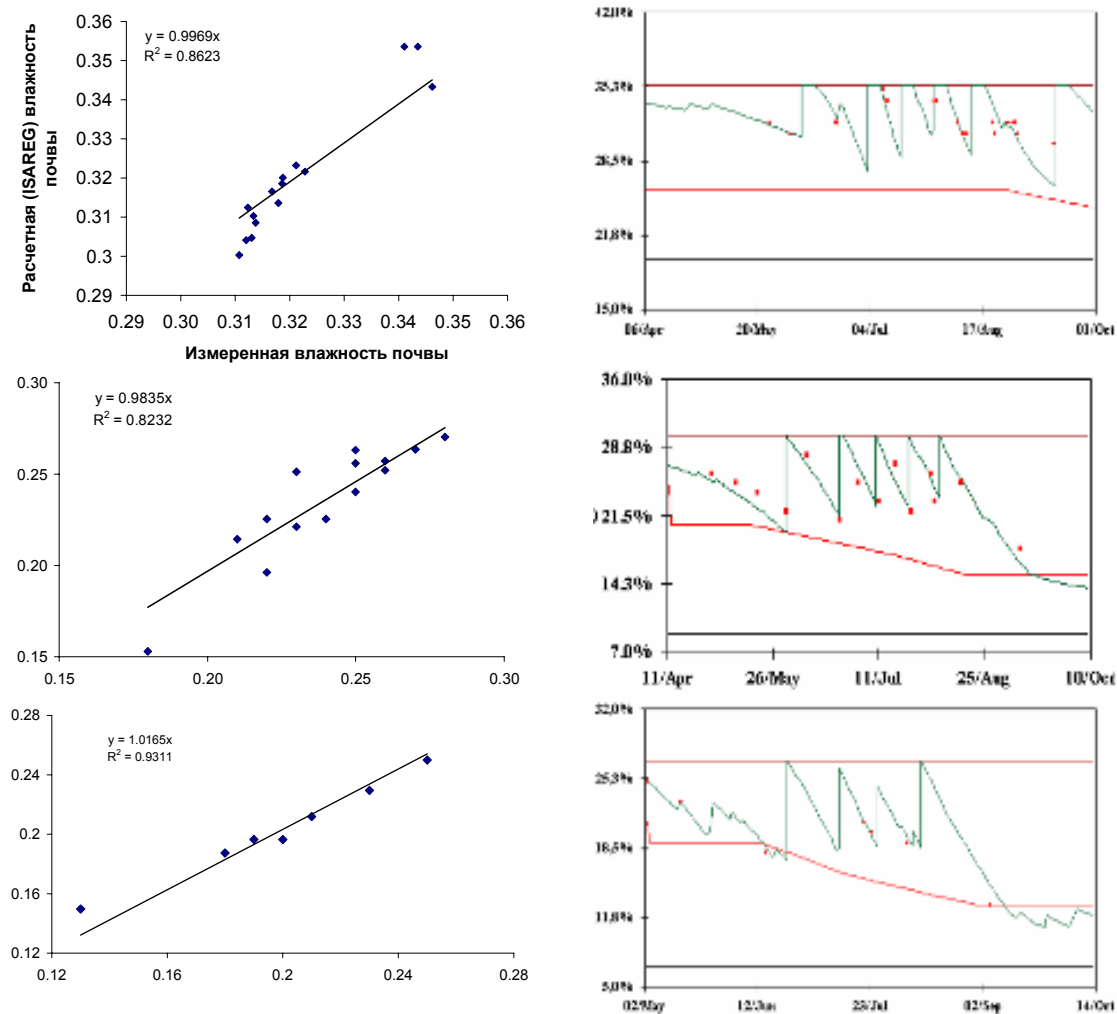


Рис. 19. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных значений почвенной влажности для хлопчатника: а) и б) в хоз-ве «Азизбек-1», 2001 (поля #13 и 5); с) в хоз-ве «Сандык», 2003

При расчете почвенной влажности по модели ISAREG использовались значения упомянутой выше эталонной эвапотранспирации, параметры сельхозкультур из таблицы 13, фактический график поливов и подпитка с грунтовых вод.

Таблица 13. Стадии роста сельхозкультур, коэффициенты сельхозкультур (K_c), глубина корневой зоны (Z_r), доля истощения при отсутствии стресса (p) и фактор зависимости урожайности (K_y), хлопчатник, Ферганская долина

Хозяйство «Азизбек-1» (Ферганская область)				
Поле #13				
Период (сроки)	<i>Начальная</i>	<i>Развитие</i>	<i>Сер. сезона</i>	<i>Конец сезона</i>
8/04 – 7/06	8/06 – 4/07	5/07 – 27/08	28/08 – 1/10	
K_c	0,11	0,11 – 1,0	1,0	1,0 - 0,55
Z_r [м]	0,7	0,7	0,7	0,7
p	0,6	0,6	0,6	0,7
K_y	0,85			
Поле #5				
Период (сроки)	13/04 – 17/05	18/05 – 17/07	18/07 – 31/08	1/09 – 10/10
K_c	0,35	0,35-1,15	1,15	0,6
Z_r [м]	1,1	1,1	1,1	1,1
p	0,25	0,45-0,6	0,7	0,7
K_y	0,85			
Хозяйство «Сандык» (Ошская область)				
Период (сроки)	4/05 – 14/06	15/06 – 14/07	15/07 – 30/08	1/09 -14/10
K_c	0,67	0,67-1	1	0,65
Z_r [м]	1	1	1	1
p	0,4	0,55	0,65	0,7
K_y	0,85			

Во всех исследуемых случаях рассчитанные и наблюдаемые величины почвенной влажности показали хорошую сходимость, при этом коэффициент регрессии приближался к 1,0, а коэффициент смешанной корреляции был равен около 0,9. Таким образом, модель правильно рассчитывает почвенную влажность для орошаемого хлопчатника.

Озимая пшеница

Обоснование модели ISAREG было выполнено путем сопоставления расчетного содержания почвенной влаги с наблюдениями (рис. 20). Оросительная норма, представляющая фактические условия, используемая для каждого случая, приведенного на рис. 20 составляла соответственно 265 и 548 мм. Расчетные и наблюдаемые значения почвенной влажности показали хорошую сходимость для обоих исследуемых случаев с коэффициентом регрессии около 1,0 и коэффициентом смешанной корреляции 0,9. Таким образом, модель правильно рассчитывает почвенную влажность для орошаемой озимой пшеницы.

Для вычисления коэффициентов озимой пшеницы по Ферганской и Ошской областям использовались суточные климатические данные за пе-

риод 2001-2002 гг. Откалиброванные параметры сельхозкультуры приведены в таблице 14.

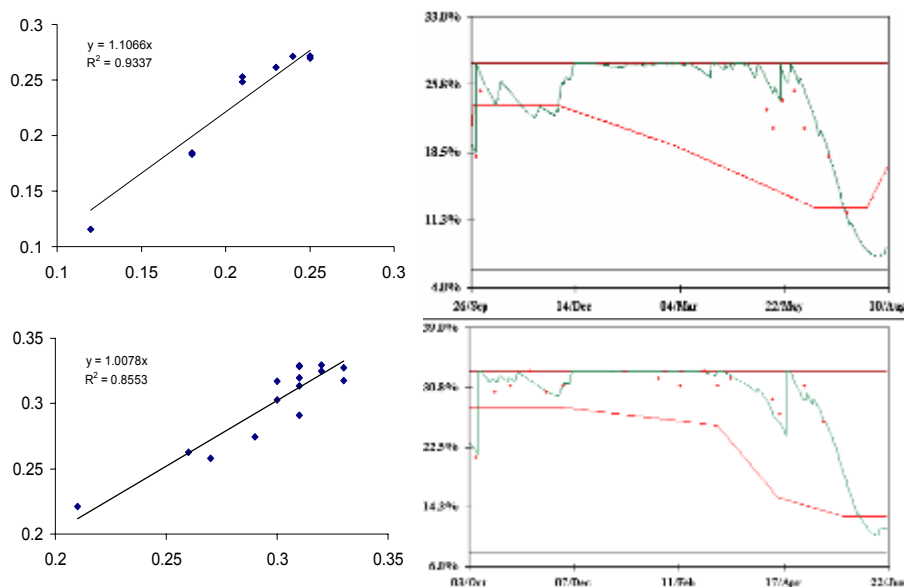


Рис. 20. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных значений почвенной влажности для озимой пшеницы, хозяйство «Толойкон», 2001-2002 (вверху) и хозяйство «Азизбек-1», 2001-2002 (внизу)

Таблица 14. Стадии роста сельхозкультур, коэффициенты сельхозкультур (K_c), глубина корневой зоны (Z_r), доля истощения при отсутствии стресса (p) и фактор зависимости урожайности (K_y), озимая пшеница, Ферганская долина

	Посев	Мерзлый грунт	Развитие	Сер. сезона	Конец сезона
<i>Хозяйство «Азизбек-1» (Ферганская область)</i>					
Период (сроки)	5/10–30/11	1/12– 7/03	08/03–14/04	15/04–25/05	26/05–22/06
K_c	1,14	0,2	1,20	1,20	0,35
Z_r [м]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
p	0,2	0,2	0,3	0,7	0,8
K_y			1,0		
<i>Хозяйство «Толойкон» (Ошская область)</i>					
Период (сроки)	28/09–30/11	1/12– 8/02	1/03–14/06	15/06–24/07	25/07–10/08
K_c	0,9	0,4	0,9	1,1	0,5
Z_r [м]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
p	0,3	0,2	0,4	0,7	0,5
K_y			0,9		

Подпитка с грунтовых вод

Данные на рис. 21 показывают, что подпитка с грунтовых вод в хозяйстве «Азизбек-1» Ферганской области играет заметную роль, когда ЕТ высокая, а глубина залегания грунтовых вод небольшая вследствие поливов на соседних полях. Это относится как к хлопчатнику, так и к озимой пшенице.

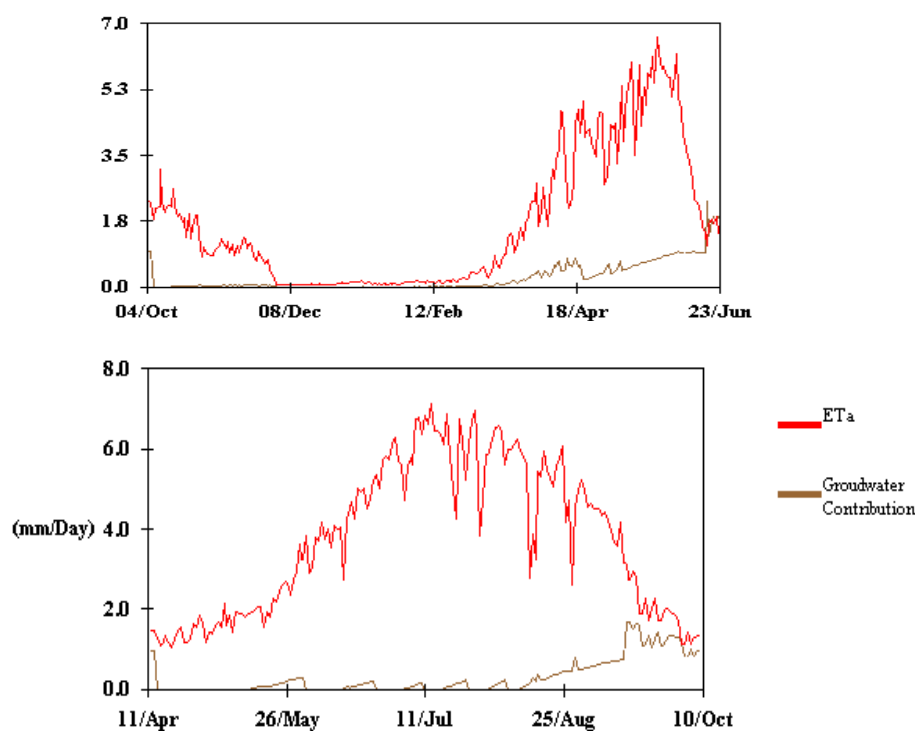


Рис. 21. Фактическая эвапотранспирация и подпитка с грунтовых вод (мм/сут) в вегетационный период: а) озимой пшеницы (2001-2002), б) хлопчатника (2001), хозяйство «Азизбек-1»

Выводы

Исследование показывает, что применение старых методов к оценке эталонной эвапотранспирации ЕТ – испаритель ГГИ-3000 и формула Иванова ЕТ_р – дает относительно высокие колебания по участкам. Коэффициенты, увязывающие эти два оценочных метода, а также эти же методы с вычисленной по методу ФАО-ПМ ЕТ_о, имеют разные значения по Фергане и Голодной степи. Для принятия общих коэффициентов сельхозкультур требуется, чтобы колебания ЕТ_о зависели только от климата, а не от расположения станции. Поэтому рекомендуется применять уравнение ФАО-ПМ (Allen *et al.*, 1998).

Калибровка/обоснование модели ISAREG была успешно выполнена на фоне наблюдений прошлых лет в период 1982-1988 гг. за почвенной влажностью и ЕТ хлопчатника в Сырдарьинской области Голодной степи. Как для почвенной влажности, так и ЕТ сельхозкультуры, коэффициенты регрессии, связывающие расчетные и наблюдаемые значения, были близки к 1,0, а коэффициенты смешанной корреляции были больше, чем 0,9. Кроме того, эти результаты были получены с использованием конкретных параметров для параметрических уравнений, используемых в ISAREG для расчета подпитки с грунтовых вод и фильтрации; таким образом, полученная хорошая сходимость показывает, что эти параметрические уравнения подходят для оценки потоков через нижнюю часть корневой зоны. Поэтому, данные исследования дали хорошие оценки коэффициентов сельхозкультур и доли истощения при отсутствии водного стресса растений, которые могут быть использованы в дальнейшем при поиске водосберегающих режимов орошения, что описано в сопутствующей статье (Чолпанкулов и др., 2005).

Модель была также протестирована на хлопчатнике и озимой пшенице на двух участках в Ферганской долине, путем сравнения расчетных и наблюдаемых значений почвенной влажности. В случае участка в Ферганской области были также протестированы и параметризованы уравнения подпитки с грунтовых вод и фильтрации. Результаты сравнения почвенной влажности, вычисленной моделью, с наблюдениями с помощью регрессии дали коэффициенты регрессии, близкие к 1,0, и коэффициенты смешанной корреляции около 0,9. Таким образом, полученная хорошая сходимость показывает, что модель была успешно протестирована и полученные параметры сельхозкультур могут быть применены для нахождения подходящих режимов орошения в данной области.

Благодарность

Авторы выражают свою благодарность г-ну Х.Умарову за помощь в полевых наблюдениях в Фергане и д-ру Г.Стулиной за предоставление дополнительной информации по Ферганскому участку.

Библиография

- Домуллоджанов, Х.Д., 1983. Рекомендации по расчету режимов орошения при программировании урожаев хлопкового севооборота в Таджикистане. Душанбе, 74 стр.
- Иванов, Н., 1957. Всемирная карта испарения. Ленинград: Гидрометеиздат (www.ingentaconnect.com, с мая 2005).
- КИИВ, 1989. Оросительные нормы сельхозсельхозкультур для Казахстана. Казахский ирригационный институт, 74 стр.

- РДМУ, 1988. Руководство по управлению. Предварительные инструкции по прогнозам водопользования в орошаемых областях, РДМУ Кыргызская ССР, стр.62.
- Руководство для наблюдений по тепловому балансу, 1977. Ленинград, Гидрометеиздат.
- Средазгипроводхлопок, 1970. Расчетные средние значения оросительных норм сельскохозяйственных культур в бассейнах рек Сырдарья и Амударья. Ташкент, НИЦ, 292 стр. (www.iwmi.cgiar.org с мая 2005г.)
- Фортес П. С., Теодоро П.Р., Кампос А.А., Матеус П.М., Перейра Л.С. 2005. Средства моделирования для расчета графика поливов: WINISAREG и GISAREG (в этом сборнике).
- Чолпанкулов, Э.Д., Милькис, Б.Э., Мухамеджанов, Ш.Ш., 1984. Оперативное управление водопользованием для контроля мелиоративных режимов. Труды САНИИРИ, том 172, Ташкент, 1984, стр. 166-174.
- Чолпанкулов, Э.Д., Баклушин, М.В., Дудко, О.П., Духовный, В.А., 1986. Прогнозирование распределения почвенной влаги на основе гидрометеорологических данных, Узбекистан, Изв. Академия Наук, том 4, Ташкент, стр. 47- 49.
- Чолпанкулов, Э.Д., Баклушин, М.В., Дудко, О.П., Духовный, В.А., 1991. Расчет сроков посева хлопчатника. ФАН, Механика обмена многофазных сред и тепловых масс, сер. Технические Наук, Ташкент, стр. 32- 35.
- Чолпанкулов, Э.Д., Урунов, Н., Дудко, О.П., 1992. Оценка суммарного испарения с хлопкового поля, «Сельское хозяйство Узбекистана». Том 4-5, Ташкент, стр. 45- 46.
- Чолпанкулов, Э.Д., Икрамов, Р.К., 1995. Принципы ограничения потребления и сброса воды при дефиците воды и ухудшении ее качества. Рефераты Республиканской научно-практической конференции, Ташкент, стр. 56-58.
- Чолпанкулов, Э.Д., Инченкова, О.П., 2002. Опыт применения программ CROPWAT и ISAREG в водохозяйственных исследованиях. В сб.: Научно-практическая конференция «Водные ресурсы Центральной Азии», Алматы, стр.148-151.
- Чолпанкулов, Э.Д., Инченкова, О.П., Перейра, Л.С., 2004. Адаптация модели планирования орошения ISAREG в условиях Центральной Азии. В: «Производство продовольствия и водные ресурсы» (Труды Межрегиональной конференции МКИД, Москва, сент. 2004), МКИД и РКИД, Москва, CD-ROM.
- Чолпанкулов, Э.Д., Инченкова, О.П., Паредес, П., Перейра, Л.С., 2005. Стратегии орошения для решения проблемы дефицита воды (в данном сборнике)
- Шредер, В.Р., Васильев, И.К., Трунова, Т.А., 1977. Гидромодульное районирование и расчет оросительных норм для хлопчатника в условиях аридной зоны. В: Кадыров, А.А. (ред.) Вопросы проектирования и эффективности работы гидромелиоративных систем Средней Азии, САНИИРИ, Ташкент, том 8: 28-41.

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998 and 2001. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements (Russian translation), FAO Irrig. Drain. Pap. 56, FAO and SIC-ICWC, Tashkent, 296 pp.
- Campos, A.A., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., Fabião, M.S., Liu, Y., Li, Y.N., Mao, Z., Dong, B. 2003. Water saving in the Yellow River Basin, China. 1. Irrigation demand scheduling. Agricultural Engineering International Vol. V (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J., Pereira, L.S., 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agri. Water Manag.* 36: 233-246.
- Liu, Y., Li, Y.N., Pereira, L.S., Fernando, R.M., Teixeira, J.L., 2000. Irrigation management strategies for water saving in North China plain In: The XIV Memorial CIGR World Congress (Tsukuba, Japan, Nov/Dec 2000) CIGR, CD-Rom paper R 1105.
- Liu, Y., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2001. Water balance simulation with ISAREG considering water table interactions. In: Zazueta, F.S., Xin, J.N. (Eds.) World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources (Foz do Iguaçu, Brasil), ASAE, St. Joseph, MI, pp. 857-863.
- Oweis, T., Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., 2003. Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Near East to cope with water scarcity. 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. 259-272.
- 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.
- Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., Machado, T.G., 2000. KCISA, a program to compute averaged crop coefficients. Application to field grown horticultural crops. In: Ferreira, M.I., Jones, H.G. (Eds.) Irrigation of Horticultural Crops (Proc. 3rd Intern. ISHS Symp., Estoril, 1999), Acta Horticulturae N° 537, ISHS, Leuven, pp. 535-542.
- 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 Bulletin*, 41(2): 29-48.
- Zairi, A., El Amami, H., Slatni, A., Pereira, L.S., Rodrigues, P.N., Machado, T.G., 2003. Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. Rossi, G. Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 181-201.

Глава 8.

СТРАТЕГИИ ОРОШЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ДЕФИЦИТА ВОДЫ

Э.Д. Чолпанкулов¹³, О.П. Инченкова¹³, П. Парадес¹⁴, Л.С. Перейра¹⁴

Реферат: Избыточный полив хлопчатника и озимой пшеницы, практикуемый в странах Центральной Азии, вызвал проблемы заболачивания земель и привел, главным образом, к затратам и потерям воды, которые поддаются контролю при улучшении режима орошения. После надлежащего тестирования использовалась модель ISAREG для имитирования текущих и расчета улучшенных вариантов режимов полива для хлопчатника и озимой пшеницы. Результаты показывают, что при применении фактических режимов орошения большая часть подаваемой воды просачивается в зеркало грунтовых вод, составляя в среднем, соответственно, от 13 до 49 % по Голодной степи и Ферганской долине. При усовершенствовании режима поливов вегетационная оросительная норма в Ферганской долине может быть сокращена на 15-60 %, а потери воды на глубинную фильтрацию могут быть ограничены.

Ключевые слова: хлопчатник, озимая пшеница, требования на орошение, дефицитное орошение, водосбережение

Введение

Избыточный полив основных сельхозкультур в Центральной Азии, связанный с низким уровнем управления подачей и распределения воды, является причиной серьезных проблем затрат и потерь воды, а также заболачивания и засоления земель. Для нахождения совершенных решений этих проблем было проведено исследование как на поле, так и с применением модели расчета режимов орошения ISAREG (Teixeira and Pereira, 1992; Pereira et al., 2003; Фортес и др., 2005). Тестирование модели для хлопчатника и озимой пшеницы описано в работах Чолпанкулова и др. (2004; 2005).

¹³ НИЦ МКВК, Узбекистан, 7000187, Ташкент, Карасу-4, 11 horst san@mail.ru

¹⁴ Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, Fax: (351 21) 362 15 75; lspereira@isa.utl.pt

Правильно подобранный режим орошения играет важную роль в достижении водосбережения, высоких эксплуатационных характеристик полива и в ограничении глубинной фильтрации, вызванной переполивом (Smith et al., 1996; Pereira et al., 2002). Компьютерные модели представляют простой подход к разработке и оценке альтернативных стратегий орошения; имеется множество моделей для расчета баланса почвенной влаги и создания более совершенных режимов орошения.

К задачам данного исследования относилась разработка подходящей практики планирования орошения, направленной на более эффективное водопользование и водосбережение. В частности, исследование было нацелено на применение модели для оценки фактических режимов орошения в рассматриваемой области и обеспечение более подходящих стратегий планирования орошения, которые бы позволили улучшить управление водой в регионе, включая водосбережение и борьбу с засолением.

Баланс почвенной влаги и моделирование

Модель ISAREG рассчитывает баланс почвенной влаги, с использованием различных вариантов, для определения и оценки режимов орошения (Teixeira and Pereira, 1992, Liu et al. 1998, Фортес и др., 2005). Применение модели для расчета усовершенствованных режимов поверхностного орошения или для оценки соответствующих возможностей сокращения водоподачи на полив описано в работах Liu et al. (2000), Campos et al. (2003), and Zairi et al. (2003).

Эталонная эвапотранспирация вычисляется по методу ФАО Пенмана-Монтейта (Allen et al., 1998), а эвапотранспирация сельхозкультуры оценивается по усовершенствованной методологии, предложенной Allen et al. (1998). Коэффициенты сельхозкультур (K_c), доля истощения почвенной влаги при отсутствии стресса растений (p) и глубины корневой системы Z_r были получены через калибровку модели, а подпитка с грунтовых вод и фильтрация были откалиброваны для условий Центральной Азии (Чолпанкулов и др., 2004; 2005).

Модель ISAREG рассчитывает требования на орошение через баланс почвенной влаги, который вычисляется для эффективной глубины корневой зоны:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - RO_i) + I_{wi} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000 z_{r_i}} \quad [1]$$

где θ_i и θ_{i-1} – содержание почвенной влаги в корневой зоне ($m^3 m^{-3}$ или $mm mm^{-1}$), в дни i и $i-1$, P_i – атмосферные осадки (мм), RO_i – поверхностный сток (мм), I_{wi} – поливная норма нетто (мм), которая просачивается в почву, ET_{ci} (мм) – эвапотранспирация сельхозкультуры (мм), DP_i – глубинная фильтрация (мм), GW_i – капиллярный подъем/подпитка с грунтовой вод

(мм) и $z_{r,i}$ – глубина распространения корней (м) в i день. GW и DP рассчитываются из гидравлических свойств почвы, глубины залегания грунтовых вод, как описано в работе Чолпанкулова и др. (2005).

Пороговая величина почвенной влаги относительно доли истощения при отсутствии стресса p выражается как

$$\theta_p = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad [2]$$

тогда соответствующая поливная норма нетто будет равна

$$I_{ni} = 1000 z_{r,i} (\theta_{FC} - \theta_p) \quad [3]$$

Полив назначается, когда достигается допустимое управление полива истощение (MAD). Когда водный стресс не допускается, то $MAD = p$; $MAD < p$ при неприятии риска или неопределенности и $MAD > p$ при допущении водного стресса для сельхозкультуры, т.е. при применении дефицитного орошения, когда полив только частично обеспечивает потребности сельхозкультур в орошении, при этом предусматривается некоторое, позволяющее получение дохода от орошения снижение урожайности. Поэтому, поливы назначаются (уравнение 1) для

$$\theta_i = \theta_{MAD} = (1 - MAD)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad [4]$$

а норма поливов представляет либо некоторый фиксированный объем D (мм), устанавливаемый пользователем, либо является переменной $D = \theta_{FC} - \theta_i$.

Потребности сельхозкультур (нетто) в орошении в вегетационный период задаются уравнением

$$IWR = \frac{ET_c - P_e - GW - \Delta S}{1 - LR} \quad [5]$$

где P_e – эффективные осадки (мм), GW – суммарный поток капиллярной подпитки в вегетационный период (мм), ΔS – общее изменение запаса почвенной влаги в корневой зоне в вегетационный период, LR – промывная доля. Валовые потребности сельхозкультур в орошении рассчитываются как

$$GIWR = \frac{IWR}{Eff} \quad [6]$$

где Eff – КПД ирригационной системы.

Потери урожайности из-за водного стресса определяются с помощью факторов зависимости урожайности (K_y), предложенных Doorenbos и Kassam (1979) для зависимости между сезонным относительным дефицитом эвапотранспирации ($RED = 1 - ET_d / ET_c$) и относительными потерями урожайности ($RYL = 1 - Y_d / Y_c$):

$$\left(1 - \frac{Y_d}{Y_c}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_d}{ET_c}\right) \quad [8]$$

где ET_d и ET_c – сезонная эвапотранспирация сельхозкультур (мм) соответственно при дефиците и полном обеспечении, а Y_d и Y_c – урожайность сельхозкультур, получаемая соответственно при эвапотранспирации сельхозкультур ET_d и ET_c .

ISAREG в зависимости от целей пользователей предлагает несколько вариантов орошения. Помимо определения потребностей в орошении нетто с целью получения максимальной урожайности, модель также позволяет составить альтернативные графики орошения, исходя из задаваемых пользователем норм и сроков поливов, которые могут назначаться разными способами и рассчитываются в соответствии с лимитами подачи воды и пороговыми величинами почвенной влаги, а также с учетом ограничений требования на воду в течение выбранных периодов (Pereira *et al.*, 2003; Fortes *et al.*, 2005).

Материалы и методы

Методика, принятая в данном исследовании, является результатом комбинации полевых экспериментов и имитационного моделирования (моделью ISAREG). Были проанализированы и использовались для калибровки модели ISAREG и получения коэффициентов и других параметров сельхозкультур данные наблюдений, взятые из предыдущих исследований в Голодной степи (1982-87) и из последних полевых опытов в Ферганской долине (Чолпанкулов и др., 2005). Эксперименты с поливами в Ферганской долине проводились в хозяйствах «Азизбек-1» Ферганской области и «Сандык» и «Голойкон» Ошской области. Полевые наблюдения, как это описано в сопутствующей статье (Чолпанкулов и др., 2005), включали наблюдения по климату, сельхозкультурам, почвам и грунтовым водам.

Моделировались две следующие стратегии орошения:

- (а) *Планирование поливов для получения максимального урожая и снижения потерь на глубинную фильтрацию*: Здесь поливы не предусматриваются, когда среднее содержание почвенной влаги равно θ_p (уравнение 2), а нормы поливов задаются с учетом восполнения почвенной влаги до уровня полевой влагоемкости $D = \theta_{FC} - \theta_p$. Исходя из реальных условий, было введено одно ограничение: поливы прекращаются соот-

ветственно за 20 или 35 дней до сбора урожая хлопка и озимой пшеницы

- (b) *Дефицитное орошение*: Пороговая величина почвенной влаги аналогично той, предусмотренной в альтернативе (a), но нормы поливов выше. Здесь применяются различные уровни дефицита влаги (MAD) и значения p , как это описано далее. Ограничения те же, что и для альтернативы (a).

Стратегии орошения хлопчатника для Голодной степи

Требования (нетто) на орошение

Потребности хлопчатника (нетто) в орошении (NIR) (уравнение 5) были вычислены для всех лет, охваченных исследованием (1982-1987) (таблица 1).

Таблица 1. Потребности хлопчатника в орошении (1982-1987)

Год	NIR (мм)
1982	521
1983	426
1984	576
1985	422
1986	523
1987	423

Оптимальное орошение, без водного стресса

Оптимальные режимы орошения были рассчитаны по параметрам сельхозкультур, приведенным в таблице 2. Сводные результаты представлены в таблице 3.

Результаты из таблицы 3 относятся к графикам поливов, смоделированным с учетом получения максимальной урожайности, т.е. когда $ET_{c\ adj} = ET_c$. Оросительные нормы нетто в вегетационный период колеблются в пределах 427-592 мм, осадки в этот период изменяются от 15 до 117 мм, а эвапотранспирация сельхозкультуры ET от 678 до 755 мм. Вегетационные поливы также связаны со значениями доступной почвенной влаги (ASW). В период сева и на момент сбора урожая значения ASW высокие, т.е. таким образом, сельхозкультура в недостаточной степени использовала аккумулированную почвенную влагу. Нормы поливов очень высокие, как практикуется здесь в настоящее время, и в качестве альтернативы может быть принято увеличение числа поливов при сниженной поливной норме.

Таблица 2. Откалиброванные коэффициенты сельхозкультуры (K_c) по стадиям роста хлопчатника (Голодная степь, 1982–1987)

Параметры	Начало	Развитие	Середина сезона	Конец сезона
1982				
Продолжит. периода (дата)	1/04 – 14/04	15/04 24/05	25/05 – 19/08	20/08 – 15/09
Коэффициенты с.-х. культуры, K_c	0,4	0,42-1,08	1,08	1,08-0,8
1983				
Продолжит. периода (дата)	22/04 – 8/06	9/06 – 9/07	10/07 – 6/09	7/09 – 30/09
Коэффициенты с.-х. культуры, K_c	0,5	0,5-1	1	1-0,25
1984				
Продолжит. периода (дата)	29/04 – 5/06	6/06 – 25/06	26/06 – 31/08	1/09 – 30/09
Коэффициенты с.-х. культуры, K_c	0,35	0,35-1,2	1,2	1,2-0,6
1985				
Продолжит. периода (дата)	22/04 – 9/06	10/06 – 27/06	28/06 – 24/08	25/08 – 30/09
Коэффициенты с.-х. культуры, K_c	0,55	0,55-1,05	1,05	1,05-0,25
1986				
Продолжит. периода (дата)	1/04 – 16/04	17/04 – 14/06	15/06 – 31/08	1/09 – 20/09
Коэффициенты с.-х. культуры, K_c	0,55	0,55-1,1	1,1	1,1-0,4
1987				
Продолжит. периода (дата)	6/05 – 5/06	6/06 – 21/07	22/07 – 31/08	1/09 – 30/09
Коэффициенты с.-х. культуры, K_c	0,45	0,45-1,1	1,1	1,1-0,4

Таблица 3. Режимы орошения хлопчатника для получения максимального урожая, Голодная степь

	<i>Поливы</i>					
	<i>1982</i>		<i>1983</i>		<i>1984</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	23 июн.	294	3 июл.	214	23 июн.	180
	8 авг.	298	12 авг.	236	16 июл.	180
					6 авг.	180
Полив (мм)	592		450		540	
Осадки (мм)	35		47		15	
TAW (мм /м)	240		210		200	
ASW при севе (мм)	403		284		240	
ASW при сборе урожая (мм)	316		119		69	
Капиллярн. подпитка (мм)	0		16		29	
ET _c (мм)	714		678		755	
	<i>1985</i>		<i>1986</i>		<i>1987</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	29 июн.	210	22 мая	135	9 июл.	202
	6 авг.	242	28 июн.	143	16 авг.	225
			22 июл.	143		
			20 авг.	143		
Полив (мм)	452		564		427	
Осадки (мм)	41		117		70	
TAW (мм /м)	230		130		200	
ASW при севе (мм)	335		163		270	
ASW при сборе урожая (мм)	140		95		103	
Капиллярн. подпитка (мм)	7		0		24	
ET _c (мм)	694		748		688	

TAW – общая доступная влага в 1 м слое, ASW – доступная почвенная влага во всем слое почвы

Нынешний сценарий орошения

Были смоделированы фактические графики поливов хлопчатника в Голодной степи с поливными нормами и сроками поливов, используемыми фермерами (таблица 4). Поскольку фермеры склонны к опережению сроков в рекомендуемых графиках поливов и применяют очень большие поливные нормы (см. Хорст и др., 2005), доля истощения почвенной влаги незначительна ($p = 0,4$).

Таблица 4. Вычисленные по программе ISAREG фактические средние графики поливов хлопчатника в Голодной степи

	<i>Поливы</i>					
	<i>1982</i>		<i>1983</i>		<i>1984</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	1 июл.	260	20 июн.	230	18 июн.	161
	6 авг.	260	22 июл.	200	31 июл.	250
			27 авг.	200	21 авг.	219
Полив (мм)	520		630		630	
Осадки (мм)	35		47		15	
TAW (мм /м)	480		315		300	
ASW при севе (мм)	302		284		240	
ASW при сборе урожая (мм)	186		194		157	
Фильтрация (мм)	50		116		87	
Капиллярн. подпитка (мм)	18		3		17	
Неиспользов. осадки (мм)	0		0		0	
ET _{c adj} (мм)	638		653		657	
ET _c (мм)	714		678		755	
	<i>1985</i>		<i>1986</i>		<i>1987</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	16 июл.	310	3 июн.	62	14 июл.	220
			3 июл.	200	30 авг.	180
			11 авг.	170		
Полив (мм)	310		432		400	
Осадки (мм)	41		117		70	
TAW (мм /м)	345		156		300	
ASW при севе (мм)	335		163		270	
ASW при сборе урожая (мм)	89		66		141	
Фильтрация (мм)	52		67		26	
Капиллярн. подпитка (мм)	19		29		17	
Неиспользов. осадки (мм)	0		0		0	
ET _{c adj} (мм)	564		608		590	
ET _c (мм)	694		748		688	

Результаты из таблицы 3 показывают, что по фактическим графикам поливов фермеров, они проводят полив раньше оптимального срока, что приводит к возникновению потерь на глубинную фильтрацию (пример на рис. 1). Однако, т.к. оросительная вода не всегда доступна в требуемые сроки, также был выявлен некоторый водный стресс с фактической ET_c меньшей, чем потенциальная ET_c. Поливные нормы очень высокие и обычно варьируют от 160 до 260 мм в зависимости от особенностей года и водообеспеченности, что способствует потерям на глубинную фильтрацию. Оросительная норма вегетации изменяется от 310 до 630 мм. Результаты из таблицы 3 показывают, что выпавшие атмосферные осадки используются

полностью, а глубинная фильтрация зачастую превышает требования на промывку (5 % от поливной нормы).

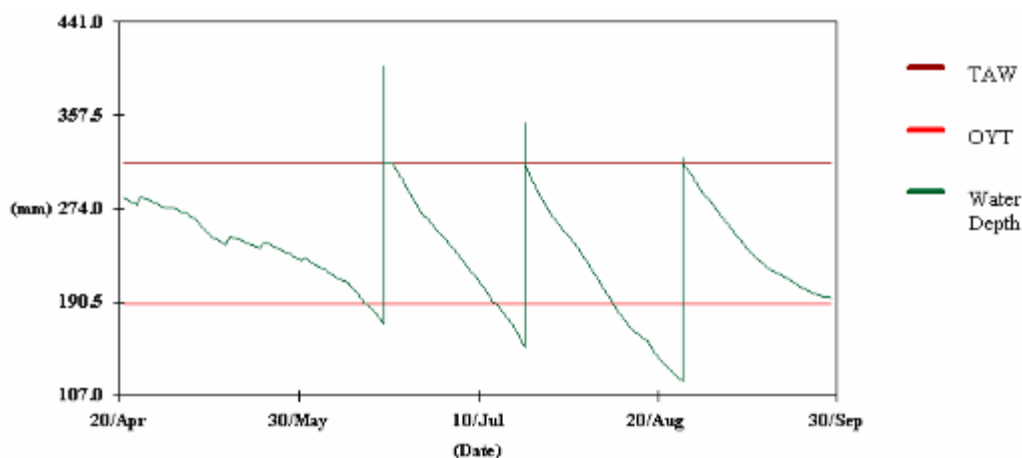


Рис. 1. Колебания влажности почвы за сезон при типичном фактическом графике орошения, указывающие на возникновение как глубинной фильтрации, так и водного стресса, Голодная степь, 1983

Улучшенные сценарии для получения максимального урожая и ограничения глубинной фильтрации

Улучшенные графики орошения были составлены с двумя главными целями: водосбережение и ограничение глубинной фильтрации (таблицы 5 и 6). Вводилось ограничение на проведение последнего полива за 20 дней до сбора урожая хлопчатника. Были приняты две пороговые величины почвенной влаги $MAD = p$: $p = 0,4$ и $p = 0,6$. Поливные нормы постоянные для каждого года и изменяются от 82 до 144 мм при $p = 0,4$ и от 123 до 216 мм при $p = 0,6$. Естественно, число поливов больше, чем при фактических графиках поливов.

Результаты, представленные в таблице 5 для $p = 0,4$ показывают, что фактическая ET_c почти равна потенциальной ET_c (таблица 3), тем самым указывая, что водный стресс отсутствует. По фактическому графику поливов (таблица 4), сезонная оросительная норма выше, но с меньшими поливными нормами, что обеспечивает ограничение глубинной фильтрации. Общее число поливов выше, совпадает с данными полевых исследований Хорста и др. (2005).

Результаты расчета графиков орошения при $p = 0,6$ приведены в таблице 6. Они показывают, что вычисленные поливные нормы близки к поливным нормам, фактически применяемым при поверхностном орошении, изменяясь от 123 до 216 мм; теоретически фильтрации можно избежать, но на практике, если не соблюдать строго сроков подачи воды, при таких высоких нормах это задача усложняется.

Таблица 5. Режимы орошения хлопчатника для сведения фильтрации к минимуму и недопущения водного стресса при доле истощения почвенной влаги $p = 0.4$, Голодная степь

	<i>Поливы</i>					
	<i>1982</i>		<i>1983</i>		<i>1984</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	16 мая	144	16 июн	126	9 июн.	120
	25 июн.	144	10 июл	126	29 июн	120
	19 июл.	144	29 июл	126	16 июл	120
	8 авг	144	21 авг	126	30 июл	120
					14 авг	120
					2 сен	120
Полив (мм)	576		504		720	
ASW при севе (мм)	302		284		240	
ASW при сборе урож. (мм)	202		161		222	
Капилляр. подпитка (мм)						
$ET_{c\ adj}$ (мм)	713		675		755	
	<i>1985</i>		<i>1986</i>		<i>1987</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	16 июн	138	3 мая	82	22 июн	120
11 июл	138	29 мая	82	17 июл	120	
29 июл	138	23 июн	82	3 авг	120	
25 авг	138	6 июл	82	22 авг	120	
		20 июл	82			
		6 авг	82			
		22 авг	82			
Полив (мм)	552		574		481	
ASW при севе (мм)	335		163		270	
ASW при сборе урож. (мм)	235		106		142	
Капиллярн. подпитка (мм)			0		3	
$ET_{c\ adj}$ (мм)	694		747		683	

$ET_{c\ adj}$ также приближается к ET_c (см. таблицу 3), таким образом удается избежать водного стресса и потерь урожая. На рис. 2 приведен пример динамики почвенной влаги при применении усовершенствованного графика поливов, когда $p = 0,6$.

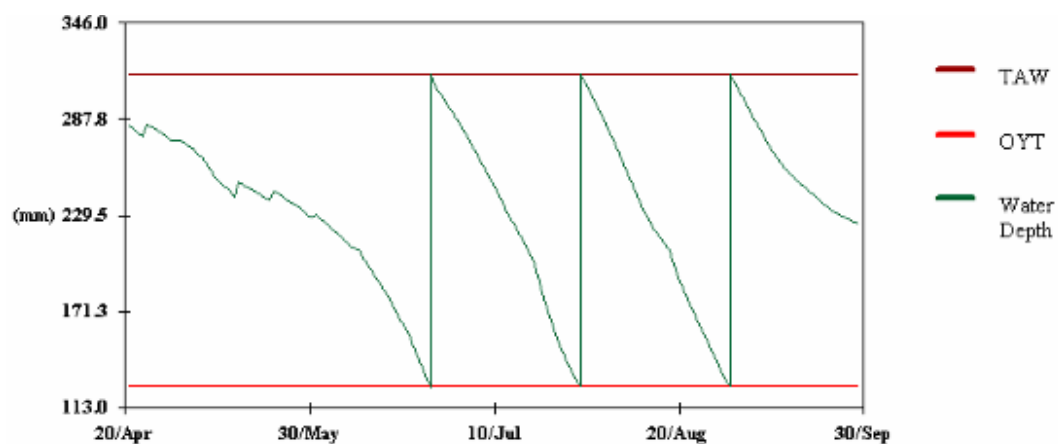


Рис. 2. Динамика влажности почвы при применении усовершенствованного графика поливов во избежание фильтрации и водного стресса, $p=0,6$
Голодная степь, 1983

Таблица 6. Режимы орошения хлопчатника для сведения фильтрации к минимуму и недопущения водного стресса при $p = 0,6$, Голодная степь

	<i>Поливы</i>					
	<i>1982</i>		<i>1983</i>		<i>1984</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	10 июн	216	27 июн	189	23 июн	180
	19 июл	216	30 июл	189	16 июл	180
	22 авг	216	1 сент	189	6 авг	180
					3 сен	180
Полив (мм)	648		567		720	
ASW при севе (мм)	302		284		240	
ASW при сборе урож.(мм)	273		225		227	
Капиллярн. подпитка (мм)	0		5		6	
ET _{c adj} (мм)	714		678		755	
	<i>1985</i>		<i>1986</i>		<i>1987</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	28 июн	207	20 мая	123	3 июля	180
29 июл	207	23 июн	123	3 авг	180	
8 сент	207	13 июл	123	2 сен	180	
			6 авг	123		
			30 авг	123		
Полив (мм)	621		614		540	
ASW при севе (мм)	335		163		270	
ASW при сборе урож. (мм)	306		146		200	
Капиллярн. подпитка (мм)	2		0		6	
ET _{c adj} (мм)	694		748		688	

Режим дефицитного орошения

В таблице 7 представлены результаты усовершенствованного режима орошения, в котором допускается водный стресс при развитии сельхозкультуры. При этом принята пороговая величина $MAD = 0,75$ и допускается доля истощения $p = 0,6$.

Результаты показывают, что даже при подаче оросительной нормы меньше, чем это требуется для полного удовлетворения потребности в оросительной воде, относительные потери урожайности незначительны (2 %). Пример соответствующей динамики почвенной влажности приведен на рис. 3.

Принятие $MAD = 0,75$ в некоторые годы может привести к значительной экономии воды (таблица 8), около 25 % от вегетационных поливов. Эта экономия становится выше при усовершенствовании системы орошения, как описано Хорстом (2005); однако, не смотря на то, что, как совершенствование режимов орошения, так и системы орошения способствует экономии воды, они не совмещены.

Таблица 7. Режим дефицитного орошения хлопчатника при $MAD=0,75$, Голодная степь

	<i>Поливы</i>					
	<i>1982</i>		<i>1983</i>		<i>1984</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	20 июн	252	6 июл	221	27 июн	210
	1 авг	252	13 авг	221	25 июл	211
					21 авг	210
Полив (мм)	504		442		631	
ASW при севе (мм)	302		284		240	
ASW при сборе урож. (мм)	145		121		159	
Капиллярн. подпитка (мм)	5		16		13	
$ET_{c\ adj}$ (мм)	701		666		740	
	<i>1985</i>		<i>1986</i>		<i>1987</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
	6 июл	242	25 мая	143	12 июл	210
14 авг	242	30 июн	143	16 авг	210	
			28 июл	143		
			25 авг	143		
Полив (мм)	484		572		420	
ASW при севе (мм)	335		163		270	
ASW при сборе урож. (мм)	181		122		108	
Капиллярн. подпитка (мм)	5		3		23	
$ET_{c\ adj}$ (мм)	683		733		676	

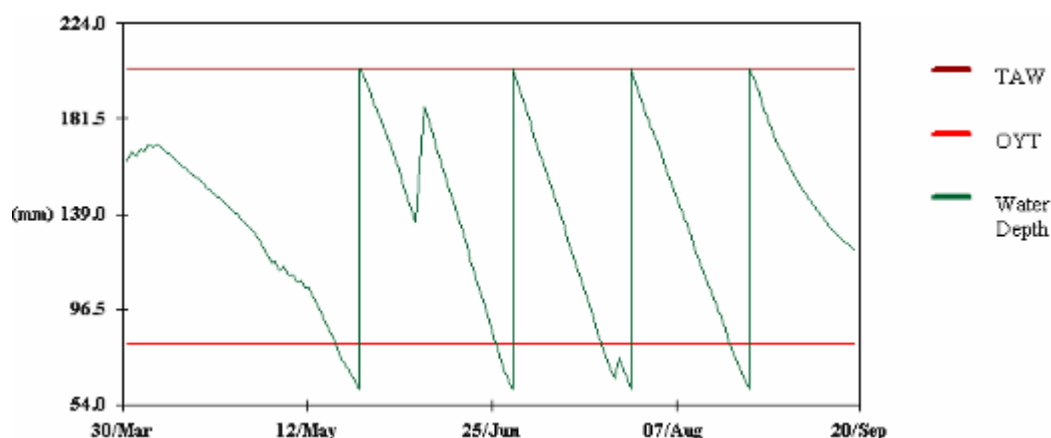


Рис. 3. Пример динамики почвенной влажности при дефицитном режиме орошения хлопчатника, принимая $MAD = 0,75$, Голодная степь, 1986

Таблица 8. Сравнение требований хлопчатника на орошение при полном ($MAD=0,6$) и дефицитном ($MAD=0,75$) орошении для $p = 0,6$

	1982	1983	1984	1985	1986	1987
$MAD=0,6$	649	567	720	621	614	541
$MAD=0,75$	504	442	631	484	572	420
Чистая экономия	145	125	89	137	32	121

Результаты по Голодной степи показывают, что значение доли истощения почвенной влаги $p = 0,6$ подходит для орошения хлопчатника и наилучшую стратегию водосбережения представляет полив при $MAD = 0,75$.

Хлопчатник и озимая пшеница в Ферганской долине

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны три участка в Ферганской долине (рис. 4): один в хозяйстве «Азизбек-1» Ферганской области в Узбекистане и два других в хозяйствах «Сандык» и «Голойкон» Ошской области в Кыргызстане. В исследовании использовались климатические данные по метеостанциям «Фергана» (Узбекистан) и «Карасу», «Ош» (Кыргызстан). Климатические и почвенные характеристики исследуемых районов описаны в сопутствующей статье, также как и параметризация сельхозкультур (Чолпанкулов и др., 2005).

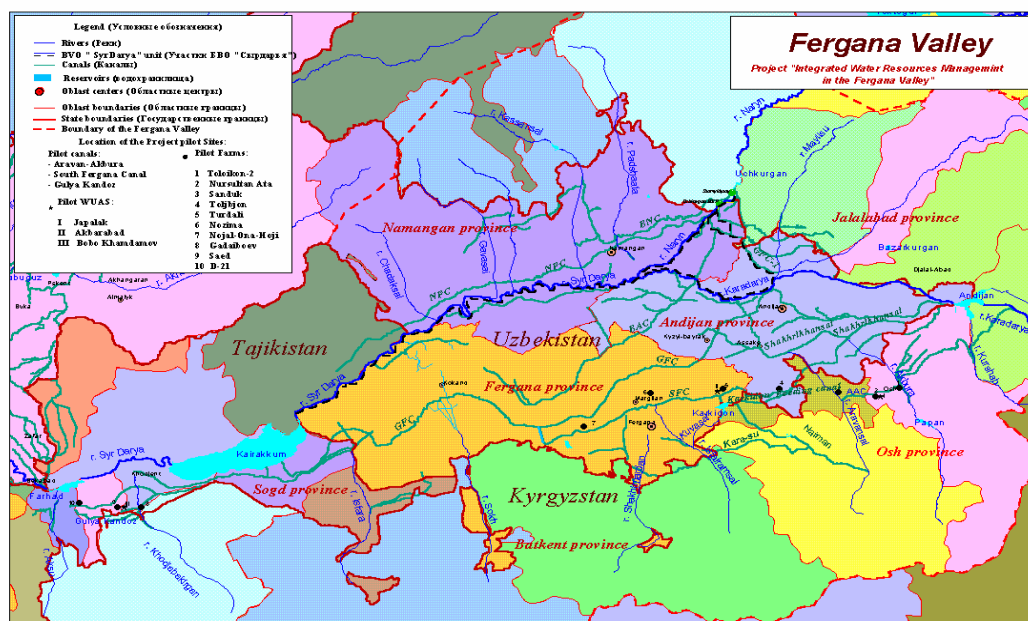


Рис. 4. Карта Ферганской долины с обозначением экспериментальных хозяйств

Параметры сельхозкультур и потребности в орошении нетто

Сценарии режимов орошения была рассчитаны с использованием параметров сельхозкультур, приведенных в таблицах 9 и 10 для хлопчатника и озимой пшеницы.

Таблица 9. Фазы роста, коэффициент сельхозкультуры (K_c) и доля истощения при отсутствии стресса для хлопчатника, Ферганская долина

Хозяйство Азизбек-1 (Ферганская область), 2001				
	<i>Начальная</i>	<i>Развитие</i>	<i>Сереина. сезона</i>	<i>Конец сезона</i>
Период	8/04 – 7/06	8/06 – 4/07	5/07 – 27/08	28/08 – 1/10
K_c	0,11	0,11 – 1,0	1,0	1,0 - 0,55
P	0,6	0,6	0,6	0,7
Хозяйство Сандык (Ошская область), 2003				
	<i>4/05 – 14/06</i>	<i>15/06 – 14/07</i>	<i>15/07 – 30/08</i>	<i>1/09 -14/10</i>
Период	4/05 – 14/06	15/06 – 14/07	15/07 – 30/08	1/09 -14/10
K_c	0,67	0,67-1	1	0,65
P	0,4	0,55	0,65	0,7

Таблица 10. Фазы роста и коэффициенты сельхозкультуры (K_c) для озимой пшеницы в Ферганской долине

Хозяйство Азизбек-1 (Ферганская область), 2001-2002					
	<i>Посадка</i>	<i>Мерзлая почва</i>	<i>Развитие</i>	<i>Середина.сезона</i>	<i>Конец сезона</i>
Период	5/10 – 30/11	1/12 – 7/03	08/03 – 14/04	15/04 – 25/05	26/05 – 22/06
K_c	1,14	0,2	1,20	1,20	0,35
P	0,2	0,2	0,3	0,7	0,8
Хозяйство Толойкон (Ошская область) 2001-2002					
Период	28/09 – 30/11	1/12 – 28/02	1/03 – 14/06	15/06 – 24/07	25/07 – 10/08
K_c	0,9	0,4	0,9	1,1	0,5
P	0,3	0,2	0,4	0,7	0,5

Потребности в орошении нетто

Потребности в орошении нетто (NIR) для хлопчатника и озимой пшеницы были определены для всех лет, по которым имелись данные. Результаты по Ферганской области показаны на рис. 5.

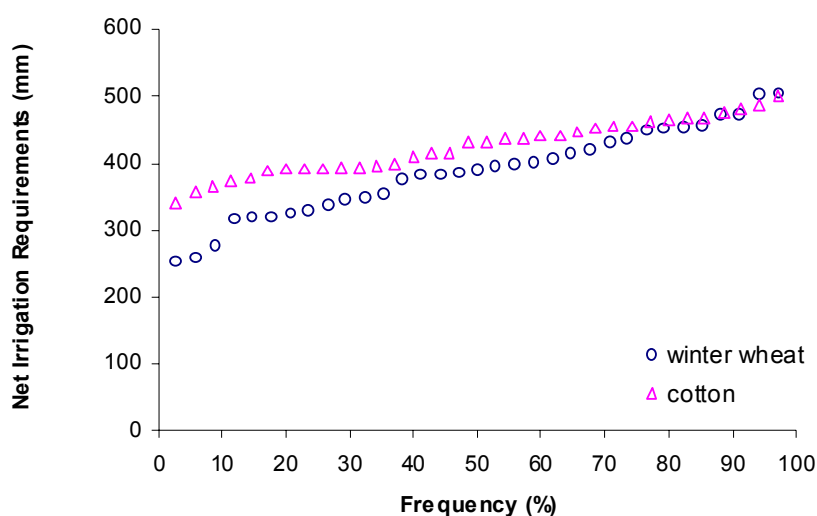


Рис. 5. Потребности в орошении (нетто) для хлопчатника и озимой пшеницы, Фергана (1970-2003)

Результаты для лет, когда проводились эксперименты, показаны в таблицах 11 и 12 для обеих сельхозкультур. Разница между участками под хлопчатником незначительна, но для озимой пшеницы она относительно высокая из-за различий в количестве осадков, выпавших в вегетационный период.

Таблица 11. Потребности хлопчатника в орошении (нетто)

Местность	Ферганская область	Ошская область
Год	2001	2003
NIR (мм)	391	370

Таблица 12. Потребности озимой пшеницы в орошении (нетто)

Местность	Ферганская область	Ошская область
Год	2001-2002	
NIR (мм)	280	358

Хлопчатник в Ферганской долине

Орошение с целью получения максимальной урожайности

Этот сценарий орошения (таблица 13) относится к графикам орошения, рассчитанным с учетом получения максимальной урожайности, т.е. без допущения водного стресса и при $ET_{c\text{adj}} = ET_c$. Рассматривались постоянные поливные нормы. Результаты показывают, что подпитка с грунтовых вод может играть ощутимую роль в снижении потребностей в оросительной воде в Ферганской области. Здесь ET_c меньше, чем в Ошской области из-за климатических различий между рассматриваемыми годами исследований.

Таблица 13. Режимы орошения хлопчатника с учетом получения максимальной урожайности, Ферганская долина

Местность	Ферганская область, 2001		Ошская область, 2003	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
Поливы после сева	1 июля	67	29 июня	120
	14 июля	67	23 июля	120
	3 авг	67	17 авг	120
	3 сент	67	13 сент	120
Полив (мм)	268		480	
Осадки (мм)	58		140	
TAW (мм /м)	155		200	
ASW при севе (мм)	100		180	
ASW при сборе урожая (мм)	75		182	
Капиллярная подпитка (мм)	138		-	
ET_c (мм)	492		618	

Текущий сценарий орошения

Используя суточные метеоданные для выбранных лет и вычисленные глубины залегания грунтовых вод, были выполнены расчеты моделью для каждого типа почв значений суммарного содержания доступной почвенной влаги (TAW) с учетом обычно применяемых средних поливных норм и частоты поливов, наблюдаемых на фермерских полях (таблица 14). Доля истощения почвенной влаги весьма низкая ($p = 0.4$) по сравнению с рекомендованной Allen *et al.* (1998) и в соответствии с наблюдениями Хорста (2005) имеет место очень высокая глубинная фильтрация (рис. 6).

Результаты показывают, что фактически применяемые режимы орошения не подходят для существующих условий почвенной влажности: подается слишком много воды, уровень почвенной влажности всегда остается высоким, включая период сбора урожая, тем самым, приводя к высокой глубинной фильтрации, причем чрезмерно высокой (23 и 57% от общей водоподачи, соответственно, по Ошской и Ферганской областям).

Результаты также показывают, что поливы проводятся не во время, что вызывает водный стресс у сельхозкультур; поэтому фактическая транспирация сельхозкультуры ($ET_{c\ adj}$) меньше, чем потенциальная транспирация (ET_c) и, следовательно, возникают потери урожая. Это указывает на необходимость одновременного улучшения как режимов орошения, так и внутрихозяйственных систем орошения (Хорст и др., 2005) для контроля потерь на фильтрацию и обеспечения экономии воды. Поэтому в дальнейших исследованиях внимание уделялось совершенствованию режимов орошения с учетом указанных аспектов.

Таблица 14. Расчет по модели ISAREG средних текущих графиков орошения хлопчатника, Ферганская долина

Место	Ферганская область, 2001		Ошская область, 2003	
	Сроки	Норма (мм)	Сроки	Норма (мм)
Поливы после сева	08 июня	119	24 июня	177
	04 июля	202	13 июля	78
	17 июля	113	27 июля	58
	30 июля	155	9 авг	14
	14 авг	183	12 авг	100
Полив (мм)	865		427	
Осадки (мм)	45		140	
TAW (мм /м)	155		200	
ASW при севе (мм)	100		180	
ASW при сборе урожая (мм)	94		77	
Фильтрация (мм)	491		98	
Капиллярная подпитка (мм)	61		-	
Неиспользованные осадки (мм)	0		0	
$ET_{c\ adj}$ (мм)	486		573	
ET_c (мм)	492		618	

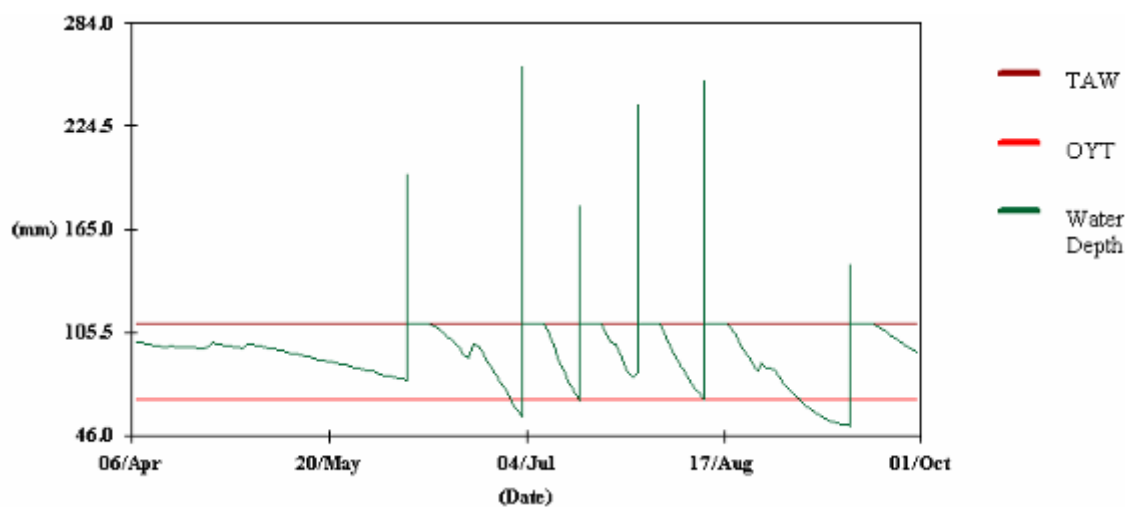


Рис. 6. Типичный текущий график полива хлопчатника, демонстрирующий избыточную подачу воды и сопутствующую фильтрацию, хоз-во «Азизбек-1», Ферганская область, 2001

Улучшенные сценарии во избежание водного стресса и фильтрации

Предложенные режимы орошения были направлены на контроль фильтрации путем корректировки поливных норм, используемых при традиционном орошении, в соответствии с нормами, рассмотренными в исследованиях по улучшению поливов по бороздам (Хорст и др., 2005) и одновременно на получение максимальной урожайности или допущение ограниченных потерь урожая.

Принимались следующие пороговые величины почвенной влаги: $p = 0,4$ и $p = 0,6$, причем первое значение соответствовало стратегиям орошения, применяемым фермерами. В таблицах 15 и 16 приведены примеры улучшенных режимов орошения.

Результаты, приведенные в таблице 15, показывают, что фактическая ET_c равна потенциальной ET_c , что указывает на отсутствие водного стресса. Относительно фактического графика поливов (таблица 14), оросительная норма намного меньше, а поливные нормы также меньше, соответственно 45 и 80 по Ферганской и Ошской областям. Подпитка с грунтовых вод продолжает играть важную роль в Ферганской области, и доступная почвенная влага при сборе урожая снижается по сравнению с рассчитанными при фактических графиках орошения, таким образом, указывая на лучшее использования почвенной влаги и осадков.

Таблица 15. Режимы орошения с учетом минимальной фильтрации и недопущения водного стресса, $p = 0,4$, Ферганская долина

Место	<i>Ферганская область, 2001</i>		<i>Ошская область, 2003</i>	
	Сроки	Полив (мм)	Сроки	Полив (мм)
Поливы после сева	17 июня	45	15 июн	80
	2 июля	44	7 июля	80
	10 июля	45	23 июл	80
	19 июля	45	9 авг	80
	1 авг	44	25 авг	80
	10 авг	45	13 сент	80
	25 авг	45		
Полив (мм)	313		480	
ASW при севе (мм)	100		180	
ASW при сборе урожая (мм)	52		182	
Капиллярная подпитка (мм)	83		-	
ET _{c adj} (мм)	486		618	
ET _c (мм)	492		618	

В таблице 16 показаны полученные после калибровки результаты повышения p до 0,6.

Таблица 16. Режимы орошения хлопчатника, направленные на минимальную фильтрацию, восполнение содержания влаги в почве до уровня ППВ и отсутствие водного стресса, $p = 0,6$, Ферганская долина

Место	<i>Ферганская область, 2001</i>		<i>Ошская область, 2003</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
Поливы после сева	1 июля	67	29 июня	120
	14 июля	67	23 июля	120
	3 авг	67	17 авг	120
	3 сент	67	13 сент	120
Полив (мм)	268		480	
ASW при севе (мм)	100		180	
ASW при сборе урожая (мм)	59		183	
Капиллярная подпитка (мм)	137		-	
ET _{c adj} (мм)	492		618	
ET _c (мм)	492		618	

Результаты из таблицы 16 указывают на увеличение подпитки с грунтовых вод на опытном участке Ферганской области и последующее сокращение числа вегетационных поливов, когда принимается значение $p=0,6$. ET_c соответствует максимальной эвапотранспирации, таким образом удастся избежать водного стресса и потери урожая. В случае Ошской области, при рассмотрении более высокого значения p ($p = 0,6$) полученная разница была незначительной.

Результаты, обобщенные в таблицах 15 и 16, показывают, что при выборе подходящих норм и сроков поливов, оросительную норму вегетации

можно значительно сократить по сравнению с фактической, а глубинную фильтрацию можно избежать, тем самым не допуская подъема уровня грунтовых вод с последующими последствиями, вызывающими засоление почв.

Режим дефицитного орошения для $p=0,6$ и $MAD=0,75$

В таблице 17 приведен улучшенный график орошения, при котором допускается некоторая степень водного стресса. Это условие соответствует началу поливов, когда содержание почвенной влаги достигает 25 % от общей доступной влаги, т.е. $MAD = 0,75$. При этом доля истощения почвенной влаги принимается равной $p = 0,6$.

Результаты показывают, что по сравнению с предыдущей стратегией, когда не допускается водный стресс, при $MAD = p = 0,6$, подпитка с грунтовых вод возрастает, а общий объем вегетационных поливов сокращается в случае хозяйства «Азизбек», не приводя к большому водному стрессу для сельхозкультур, а в Ошской области разница между стратегиями небольшая. В таблице 18 суммируются различия в водопользовании при использовании обоих графиков, из которой видно, что в случае ограниченного дефицита воды ожидается достаточно большая экономия воды, при этом потери урожайности будут составлять менее 8 %.

Таблица 17. Режим дефицитного орошения хлопчатника при $MAD=0,75$, на примере Ферганской долины

Место	Ферганская область, 2001		Ошская область, 2003	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
Поливы после сева	5 июля	78	4 июля	140
	26 июля	78	1 авг	140
			31 авг	140
Полив (мм)		156		420
ASW при севе (мм)		35		180
ASW при сборе урожая (мм)		197		132
Капиллярная подпитка (мм)		197		-
$ET_{c\ adj}$ (мм)		456		609
ET_c (мм)		492		618

Таблица 18. Сравнение потребностей хлопчатника в оросительной воде при полном и дефицитном орошении ($p = 0,6$ в обоих случаях)

	Ферганская область	Ошская область
$MAD = 0,6$	268	480
$MAD = 0,75$	156	420
Чистая экономия	112	60

Улучшенные графики поливов из таблицы 16 могут быть предложены для внедрения, но с учетом адаптации к климатическим условиям текущего года.

Озимая пшеница

Орошение с учетом получения максимальной урожайности

Сценарий орошения из таблицы 19 относится к графикам орошения, рассчитанным с учетом получения максимальной урожайности, при этом не допуская водного стресса, т.е. при $ET_{c\ adj} = ET_c$.

Результаты, представленные в таблице 19 показывают, что также как и в случае выращивания хлопчатника, подпитка с грунтовых вод играет важную роль в уменьшении потребностей в оросительной воде в Ферганской области. Результаты указывают, что неравномерное распределение атмосферных осадков приводит к тому, что они не полностью используются, а во время сбора урожая уровень почвенной влажности относительно высокий. Это особенно заметно на примере Ошской области.

Таблица 19. Режимы орошения озимой пшеницы, нацеленные на получение максимальной урожайности, для доминирующих почвенных классов в Ферганской долине

Место	Ферганская область		Ошская область	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
Поливы после сева	20 ноября	105	8 ноября	132
	12 мая	105	16 июня	132
	5 июня	105	10 июля	132
Полив (мм)		315		396
Осадки (мм)		219		524
ТАW (мм /м)		175		220
ASW при севе (мм)		105		132
ASW при сборе урожая (мм)		134		88
Капиллярная подпитка (мм)		58		-
Неиспользованные осадки (мм)		98		271
ET_c (мм)		465		694

Фактический сценарий орошения

Как и в случае расчетов, выполненных моделью для хлопчатника, этот сценарий моделировался с использованием средних норм и сроков поливов, наблюдаемых на фермерских полях (таблица 20). Аналогично можно наблюдать, что фермеры обычно подают воду раньше оптимального срока, тем самым принимая безопасный график поливов, не допускающий стресса, но приводящий к высокой глубинной фильтрации и ограниченному использованию атмосферных осадков. Тот факт, что они проводят поливы за пределами подходящих сроков, в основном из-за относительно низкого

уровня распределения воды в системе (см. Духовный и Тучин, 2005), свидетельствует тем не менее о том, что избыток воды взаимодействует с водным стрессом ($ET_{c\ adj} < ET_c$).

Пример режима орошения с избыточными поливными нормами приведен на рис. 7. Результаты показывают, что в настоящее время практикуется проведение поливов до замерзания почвы, до октября, для восполнения влагозапасов в почвенном профиле. Этот предпосевной полив обеспечивает запасы влаги для ранних стадий развития сельхозкультуры. Фактические режимы орошения не являются подходящими и результатом избыточной водоподачи является фильтрация (73 % и 45 % от общей оросительной нормы соответственно по Ферганской и Ошской областям).

Таблица 20. Вычисленные по модели ISAREG средние текущие графики поливов озимой пшеницы в Ферганской долине

Место	<i>Ферганская область</i>		<i>Ошская область</i>	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
Поливы после сева	10 окт	163	1 окт	124
	16 фев	119	20 мая	141
	08 марта	130		
	20 апр	137		
Полив (мм)		548		265
Осадки (мм)		219		524
TAW (мм /м)		175		220
ASW при севе (мм)		105		132
ASW при сборе урожая (мм)		55		30
Фильтрация (мм)		400		118
Капиллярная подпитка (мм)		62		-
Неиспользованные осадки (мм)		70		236
$ET_{c\ adj}$ (мм)		409		537
ET_c (мм)		465		694

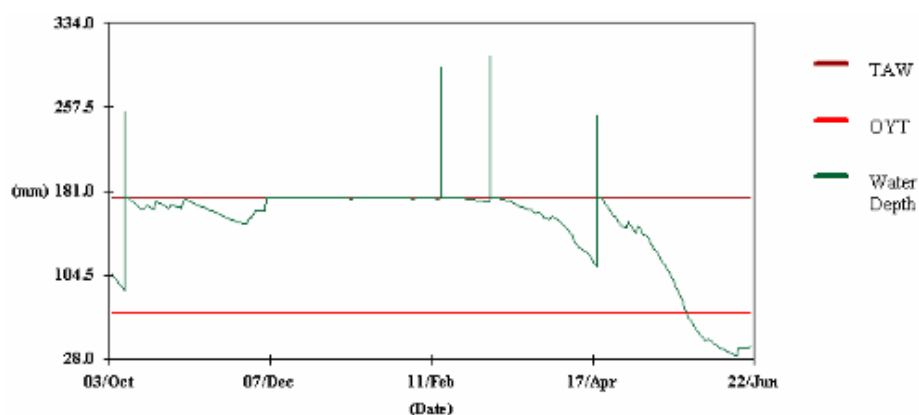


Рис. 7. Динамика почвенной влажности для типичного текущего режима орошения с избыточной подачей воды и возникновением фильтрации в хозяйстве «Азизбек-1» Ферганской области

Улучшенные сценарии при отсутствии водного стресса

Моделью рассчитывались графики поливов, нацеленные на снижение фильтрации и получение максимальной урожайности, для $MAD = p = 0,6$ (таблица 21). Результаты, полученные для Ферганской области, указывают на увеличение подпитки с грунтовых вод и небольшую разницу между фактической ET_c и потенциальной ET_c , что приводит лишь к небольшим потерям урожая; по объекту в Ошской области результаты менее удачны. На рис. 8 приведен пример улучшенного режима орошения, направленного на сведение фильтрации к минимуму.

Таблица 21. Режим орошения озимой пшеницы в Ферганской долине с учетом сведения фильтрации к минимуму и недопущению водного стресса при $p = 0,6$

Место	Ферганская область		Ошская область	
	Сроки	Норма (мм)	Сроки	Норма (мм)
Поливы после сева	20 нояб	105	8 нояб	132
	12 мая	105	16 июня	132
Полив (мм)		210		264
ASW при севе (мм)		105		132
ASW при сборе урожая (мм)		51		28
Капилляр. подъем (мм)		69		-
Неиспольз. осадки (мм)		99		271
$ET_{c\ adj}$ (мм)		453		622
ET_c (мм)		465		694

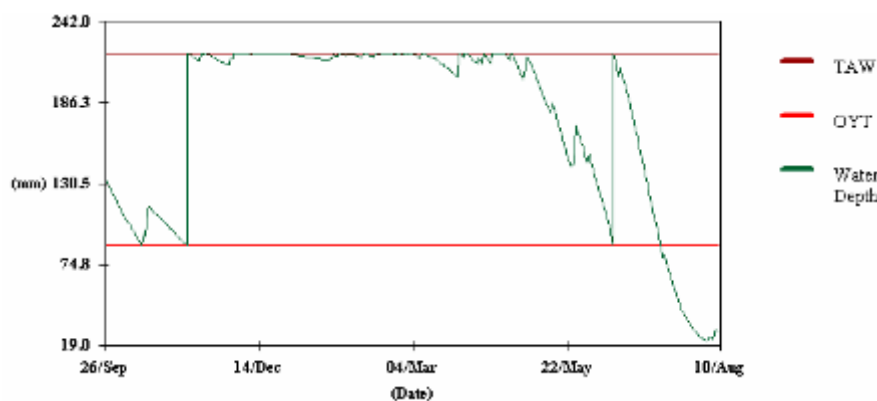


Рис. 8. Динамика почвенной влажности для улучшенного графика орошения озимой пшеницы, нацеленного на водосбережение, отсутствие фильтрации и максимальную урожайность, на примере хозяйства «Голойкон» в Ошской области

Сценарий дефицитного орошения

Улучшенный график орошения, когда при развитии сельхозкультуры допускается водный стресс, представлен в таблице 22. Вводилась пороговая величина для начала поливов, а именно содержание почвенной влаги на уровне 25 % от общей доступной влаги ($MAD = 0,75$), что приводит к потерям урожайности. Величина $p = 0,6$ принималась постоянной.

Результаты показывают, что можно достичь экономии воды (от 100% как изображено на рис. 9 в год с большим количеством осадков до 42% соответственно в Ферганской и Ошской областях) без существенных потерь урожайности (менее 19%). Капиллярные потоки составляют очень большую долю, в случае с Ферганской областью, в компенсации эвапотранспирации, тем самым сильно дополняя атмосферные осадки. Однако подобный график является не более чем показательным и не может быть применим для большинства лет, поскольку требования на орошение нетто обычно колеблются в пределах 250 - 500 мм (рис. 5).

Таблица 22. Режим орошения озимой пшеницы при $MAD = 0,75$ и $p = 0,6$ в Ферганской долине

Место	<i>Ферганская область</i>		<i>Ошская область</i>	
	Сроки	Норма (мм)	Сроки	Норма (мм)
Поливы после сева			23 июня	154
Полив (мм)	полив не требуется		154	
ASW при севе (мм)	105		132	
ASW при сборе урожая (мм)	34		32	
Капилляр. подъем (мм)	87		-	
Неиспольз. осадки (мм)	0		139	
$ET_{c\ adj}$ (мм)	453		637	
ET_c (мм)	492		694	

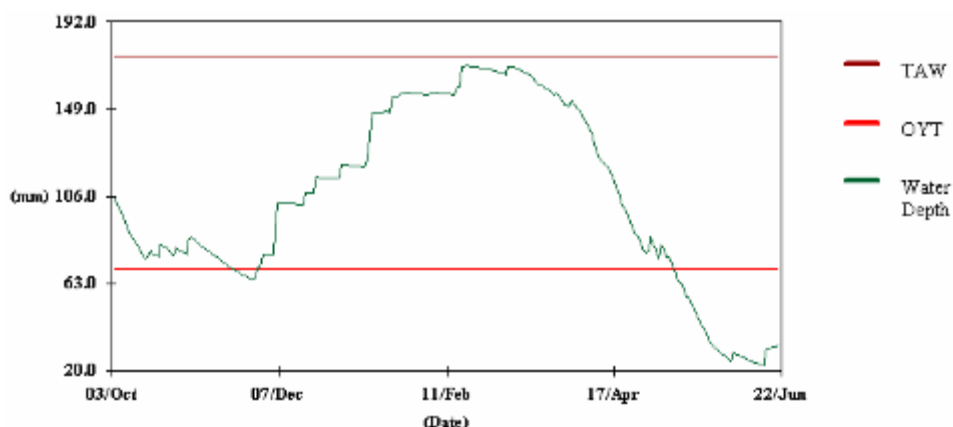


Рис. 9. Пример динамики почвенной влажности при выращивании озимой пшеницы с использованием режима дефицитного орошения ($MAD = 0,75$) в хозяйстве «Азизбек-1» Ферганской области в богарных условиях

Выводы

Представленное исследование демонстрирует, что в свете текущих условий дефицита воды, с которым сталкиваются страны Центральной Азии, полезно использовать имитационные модели поливов для расчета альтернативных режимов орошения. Кроме того, результаты показывают, что версия WINISAREG модели ISAREG была успешно применена для расчета текущих и планируемых режимов орошения для Голодной степи и Ферганской долины. В обеих экспериментальных зонах, при выращивании хлопчатника и озимой пшеницы, реальные графики орошения отражают крайне невыгодное использование воды, теряемой на фильтрацию, что может способствовать засолению почв. Таким образом, следует избегать варианта, используемого фермерами, когда поливы проводятся с опережением графика и с очень высокими поливными нормами, предлагая им альтернативные режимы орошения, аналогичные режимам, представленным в данной статье, но адаптированные к реальным климатическим и почвенным условиям.

С этой целью следует подготавливать графики для $p = 0,6$ и MAD в пределах $0,6-0,75$ для хлопчатника и $p = 0,55$ и MAD в пределах $0,55-0,7$ для озимой пшеницы, аналогичные графикам, представленным в данной статье для лет из набора данных, соответствующих гумидным, средним, засушливым и очень засушливым условиям. Эти графики можно выбирать на ранней стадии вегетационного периода, предлагать их фермерам для планирования орошения и затем периодически корректировать их с учетом реальных климатических условий. Использование версии GISAREG с этой целью могло бы быть полезным для распространения информации в пространственном масштабе. Также можно достичь дальнейшей экономии воды при сочетании усовершенствованных режимов орошения и техники полива по бороздам.

Благодарность

Выражаем отдельную благодарность Х. Умарову за помощь в полевых исследованиях и О. Усмановой за помощь в переводе при совместной работе авторов.

Библиография

- Шредер В.Р. и др., 1970. Расчетные значения оросительных норм сельскохозяйственных культур в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи, Ташкент.
- Шредер В.Р., Васильев И.К. и Трунова Т.А. Гидро модульное районирование и расчет оросительных норм для хлопчатника в условиях аридной зоны. //Вопросы проектирования и эффективности работы гидромелиоративных систем Средней Азии: Сб. науч. тр./Средазгипроводхлопок. - Ташкент, 1977. - вып.8. с.28-41.

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, FAO, Rome, 300 p.
- Campos, A.A., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., Fabião, M.S., Liu, Y., Li, Y.N., Mao, Z. and Dong, B. 2003. Water saving in the Yellow River Basin, China. 1. Irrigation demand scheduling. *Agricultural Engineering International* Vol. V (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.G. 1977. Crop Water Requirements. *Irrig. Drain. Paper* 24, FAO, Rome, 193 p.
- Fortes, P.S., Platonov, A.E. and Pereira, L.S. 2004. GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use and environmental control. *Agric. Water Manag.* (submitted).
- Horst, M.G., Shamutalov, Sh.S., Pereira, L.S. and Gonçalves, J.M. 2004. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agric. Water Manag.* (submitted).
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J. and Pereira, L.S. 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agri. Water Manag.* 36: 233-246.
- Liu, Y., Li, Y.N., Pereira, L.S., Fernando, R.M. and Teixeira, J.L. 2000. Irrigation management strategies for water saving in North China plain In.: The XIV Memorial CIGR World Congress (Tsukuba, Japan, Nov/Dec 2000) CIGR, CD-Rom paper R 1105.
- Liu, Y., Fernando, R.M. and Pereira, L.S. 2001. Water balance simulation with ISAREG considering water table interactions. In: Zazueta, F.S. and Xin, J.N. (Eds.) *World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources* (Foz do Iguaçu, Brasil), ASAE, St. Joseph, MI, pp. 857-863.
- Oweis, T., Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., 2003. Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Near East to cope with water scarcity. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi and M., Zairi, A. (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 259-272.
- Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N. and 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.
- Rodrigues, P.N., Pereira, L.S. and Machado, T.G. 2000. KCISA, a program to compute averaged crop coefficients. Application to field grown horticultural crops. In: Ferreira, M.I. and Jones, H.G. (Eds.) *Proceedings of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops* (Estoril, Jun-Jul 1999), *Acta Horticulturae* N° 537, ISHS, Leuven, pp. 535-542.
- Stewart, J.L., Hanks, R.J., Danielson, R.E., Jackson, E.B., Pruitt, W.O., Franklin, W.T., Riley, J.P. and 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. and Pereira, L.S. 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. ICID Bulletin, 41(2): 29-48.
- Zairi, A., El Amami, H., Slatni, A., Pereira, L.S., Rodrigues, P.N. and Machado, T. 2003. Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia.
- Rossi, G. Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M. and Zairi, A. (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 181-201.
- Eric D. Cholpankulov, Olga P/Inchenkova, Luis S.Pereira, 2004 adaptation of irrigation scheduling model ISAREG to conditions of Central Asia ICID International Conference Food Production and Water: Social and economic Issues of Irrigation and Drainage, pp.37-38

Глава 9.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРОЗЕМНЫХ ПОЧВ И РАЗВИТИЯ КУЛЬТУР С ЦЕЛЮ КАЛИБРОВКИ МОДЕЛИ «RZWQM» ДЛЯ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ

Г.В. Стулина¹⁵, М.Р. Камейра¹⁶

Реферат: Расположенный в бассейне Аральского моря Узбекистан страдает от экологических проблем, связанных с засолением земель и дефицитом водных ресурсов. В условиях ограниченности ресурсов, производство сельскохозяйственных культур должно основываться на минимальном использовании ресурсов при обеспечении максимальной прибыли. Поиск наилучшего варианта использования имеющихся ресурсов для получения максимального урожая культур может быть упрощен при проведении в интерактивном режиме выборочных полевых экспериментов и моделирования. Данное исследование относится к экспериментальной фазе работ, во время которой полевые эксперименты проводились в условиях общераспространенной практики управления сельскохозяйственным производством в регионе. Целью настоящего ис-

¹⁵ Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), дом 11, Карасу-4, Ташкент, 700187, Узбекистан. E-mail: galina_stulina@mail.ru

¹⁶ Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, Fax: (351 21) 362 15 75; lspereira@isa.utl.pt

следования является изучение свойств орошаемых сероземных почв и взаимосвязей между почвенной влагой и ростом растений для уточнения параметров, используемых в модели расчета оптимальной влажности корнеобитаемой зоны с учетом качества оросительной воды (RZWQM). В сопутствующей статье описывается компьютерная модель, используемая для моделирования и анализа воздействий различных сельскохозяйственных управленческих сценариев на урожайность культур. Исследования проводились в течение вегетационного периода 2001 года на репрезентативном поле, засеянном кукурузой и орошаемом водой с повышенной минерализацией, в Ферганской долине. Водно-физические свойства почв определялись на почвенных монолитах в полевых условиях, наряду с лабораторными методами. Влажность почв, потенциал почвенной влаги, солевой режим и развитие растений контролировались в течение всего периода. Применяемые методики исследований были адекватны для определения основных параметров, необходимых для моделирования.

Ключевые слова: водно-физические свойства почв; почвенная влага; развитие растения; кукуруза, Фергана.

Введение

Расположенная в бассейне Аральского моря, Республика Узбекистан подвержена процессам опустынивания, что препятствует её устойчивому развитию. Преобладающий на территории республики аридный климат предопределяет необходимость интенсивного орошения выращиваемых культур. Рост населения, освоение новых земель, резкое увеличение водозабора из крупных рек Сырдарьи и Амударьи, истощение водных ресурсов рек, а также ряд засушливых лет привели к нарушению природного равновесия и водно-солевого баланса. Кроме того, экономика республики находится в состоянии перехода к рыночным отношениям со многими проблемами, сопутствующими подобным изменениям. Взгляд на управление водными и земельными ресурсами с позиций решения этих проблем представлен в работе Духовного и Соколова (1998).

Орошаемое земледелие было и остается основным водопользователем в регионе, потребляя до 90 % от общего объема водных ресурсов. Поиск реальных путей повышения продуктивности оросительной воды является важным направлением решения проблем, связанных с дефицитом водных ресурсов. Среди других решений, моделирование является эффективным инструментом для разработки новых подходов в управлении. Мы должны гарантировать, что модели и их параметры отражают реальную ситуацию с максимально возможной степенью. Чтобы собрать необходимые данные для моделирования, эксперименты должны быть правильно спланированы. Плохая организация отбора образцов может привести к неприемлемости

собранных данных для хорошо продуманной модели или их использование даст плохие результаты (Addiscot и др., 1995 г.). Некоторые параметры не могут быть получены прямыми измерениями, или это связано с большими трудностями, поэтому другим эффективным способом является определение таких параметров расчетным путем, используя полученные в ходе исследований данные, независимо от типа моделируемой задачи (Addiscot и др., 1995 г.).

Целью настоящего исследования является определение параметров, на основе полевых и лабораторных работ, необходимых для модели расчета оптимальной влажности в корнеобитаемой зоне, с учетом качества воды. При моделировании оценивается влияние различных сельскохозяйственных управленческих сценариев, включая борьбу с засолением земель и управление орошением, на урожаи культур. Результаты моделирования анализируются в сопутствующей статье (Стулина и др., 2005 г.).

Исследования проводились в Ферганской долине в течение вегетационного периода 2001 года на репрезентативном поле, засеянном кукурузой и орошаемом водой с повышенной минерализацией. Водно-физические свойства почв определялись на почвенных монолитах в полевых условиях, а также лабораторными методами. Влажность почв, потенциал почвенной влаги, солевой режим и развитие растений контролировались в течение всего периода.

Методика исследований

Расположение и общее описание экспериментального участка

Полевые исследования проводились на поле 5, засеянном кукурузой, расположенном в хозяйстве Азизбек-1 в течение вегетационного периода 2001 года. Хозяйство расположено на территории бывшего совхоза Ниязов в Ахунбабаевском районе Ферганской области в бассейне реки Сырдарья. Участок расположен на пологой пролювиальной равнине, которая образует периферийную часть конуса выноса рек Маргилансай, Шахимардансай и Исфарамсай. Равнина имеет небольшой уклон в сторону современной долины реки Сырдарья. Высотные отметки колеблются от 429 до 434,7 м. Густая сеть ирригационных каналов, получающих воду из Большого Ферганского канала (БФК), обслуживает интенсивное сельское хозяйство, развитое на равнине. Дренажная система состоит из открытых и закрытых дренажей и коллекторов глубиной 5-7 м и более. Уклоны поверхности земли в северном направлении незначительны от 0,002 до 0,005 м/м.

Климат

Климат региона континентален и ариден. Лето жаркое и сухое, а зима холодная с умеренными морозами (рис. 1). Температурный режим поверхности почв аналогичен температурному режиму воздуха. Среднегодовая температура поверхности почв - 21,2 °С.

Среднемноголетнее количество осадков - 169 мм. Распределение осадков неравномерно, наибольшее количество осадков выпадает вне вегетационного периода (112 мм), с максимальным количеством в марте (24 мм). В вегетационный период, наибольшее количество осадков выпадает в апреле-мае (18-19 мм), а минимальное в июле-августе (2-4 мм). В 2001 году, распределение осадков в течение года отличалось от среднемноголетнего распределения. Весна была засушливой, и только 42 % осадков выпало в марте. Летом количество осадков превысило среднемноголетние показатели.

Средняя относительная влажность (RH) воздуха - 52 %. Июнь является самым засушливым месяцем (RH = 46 %), в то время как с декабря по февраль влажность воздуха достигает 80 %. Густые туманы и снежный покров также характерны для зимних месяцев.

Потенциальное испарение со свободной водной поверхности высокое, достигая 924 мм за период апрель-сентябрь при максимальной величине испарения 206 мм в июле. В 2001 году режим испарения отличался от обычного, так как испарение уменьшилось в середине вегетационного периода из-за осадков.

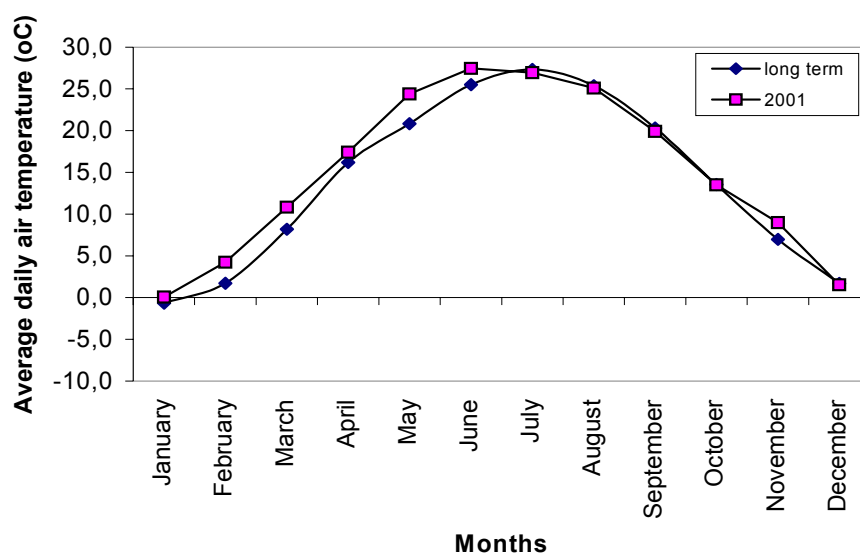


Рис.1. Температура воздуха: средние значения для периода 1970-2000 гг. и значения 2001 г. Ферганская метеорологическая станция

Почвы и гидрогеология

На большей части Ферганской долины отмечается близкое залегание грунтовых вод, как безнапорных, так и связанных с глубокими напорными горизонтами подземных вод. Артезианские воды залегают на глубине 120-200 м. Удельный дебит скважин составляет, в среднем, 1 л/с. Вода пре-

сная, с минерализацией около 0,55 г/л. Преобладает сульфатно-гидрокарбонато-кальциево-магниевый тип минерализации. Глубина залегания поверхности грунтовых вод изменяется от 1,2 до 2,1 м в супесчаных и суглинистых отложениях. Минерализация грунтовых вод составляет 2,9-4,6 г/л. По химическому составу грунтовые воды сульфатно-хлоридного и сульфатного типа. Высокая минерализация определяется незначительным уклоном и затрудненным оттоком грунтовых вод. Уклон поверхности грунтовых вод равен 0,002-0,0025, что указывает на слабую дренированность земель. Небольшой уклон и низкая проводимость верхней толщи почвогрунтов являются причиной застойности грунтовых вод, и вследствие их испарения происходит накопление солей в почве и повышение минерализации грунтовых вод. Грунтовые воды подпитываются, в основном, за счет инфильтрации при орошении, фильтрационных потерь из оросительной сети и подпитки из глубоких напорных водоносных горизонтов.

Почвы сероземные с большим содержанием кальция, сформированные на аллювиально-пролювиальных отложениях конуса выноса. Два почвенных профиля были выбраны для анализа на экспериментальных полях. Сероземные почвы описаны Добровольским (1979 г.), Богатыревым *и др.*, (1988 г.) и Умаровым (1975 г.). Полевые и лабораторные исследования были выполнены для изучения параметров почв (дополнительная информация в статье Стулиной, 2003 г.). В таблице 1 приведены механический состав и объемная масса характерных слоев почв от поверхности почвенного разреза до глубины 130 см. Объемная масса почв примерно одинакова на глубинах ниже 20 см, за исключением слоя 35-50 см, который имеет более низкое значение объемной массы. Также поверхностный слой имеет небольшую объемную массу 1,1 г/см³, вероятно, из-за разрыхления при вспашке. Меньшая объемная масса почв влияет на их влагоудерживающую способность, особенно в зонах повышенной влажности.

Таблица 1. Механический состав и объемная масса характерных слоев почвы, Ферганская долина, хозяйство Азизбек, поле № 5

Слой почвы (см)	Распределение частиц, (%)			Объемная масса, г/см ³
	Песчаные фракции	Пылеватые фракции	Глинистые фракции	
0-20	33	52	15	1,10
20-35	34	52	14	1,50
35-50	45	48	7	1,32
50-90	48	42	10	1,50
90-130	47	46	7	1,52

В таблице 2 представлен химический состав почв, определенный по водной вытяжке 1:5. Общее содержание солей распределено равномерно по профилю, не превышая 1,1 %. В ионном составе солей преобладают ионы кальция и сульфатов, которые составляют 11–15 мэкв на 100 г почвы. Другие ионы представлены Mg (0,986-1,726 мг-экв на 100 г почвы), Na + (0,609-0,826 мг-экв на 100 г почвы), Cl - (0,423-0,846 мг-экв на 100 г почвы), и HCO₃ (менее 0,2 мг-экв на 100 г почвы)

Таблица 2. Химический состав водной вытяжки 1:5 почв на опытном поле (17.03.2001 г.)

Горизонт, см	Содержание (%)						
	EC 1:1, dS/m	TDS	HCO ₃ '	Cl'	SO ₄ "	Ca	Mg
A n 0-25	1,34	1,05	0,012	0,015	0,671	0,260	0,015
B 1 45-66	1,49	1,03	0,012	0,025	0,654	0,250	0,012
B 2 66-83	1,25	1,02	0,009	0,020	0,647	0,250	0,018
B 3 83-94	1,33	1,06	0,012	0,020	0,714	0,270	0,018
B 4 94-120	1,39	1,07	0,012	0,025	0,708	0,275	0,015
B 5 121-143	1,43	1,01	0,009	0,020	0,728	0,275	0,018
B 6 143-173	1,44	1,08	0,015	0,030	0,747	0,280	0,021
B 7 173-200	1,38	1,01	0,012	0,025	0,715	0,275	0,018

Горизонт, см	Содержание (мэкв на 100 г почвы)						
	Na'+K'	HCO ₃ "	Cl'	SO ₄ "	Ca	Mg	Na'+K'
A n 0-25	0,019	0,197	0,423	13,956	13,000	1,233	0,826
B 1 45-66	0,018	0,197	0,705	13,603	12,500	0,986	0,783
B 2 66-83	0,016	0,147	0,564	13,457	12,500	1,479	0,696
B 3 83-94	0,016	0,197	0,564	14,860	13,500	1,479	0,696
B 4 94-120	0,015	0,197	0,705	14,735	13,750	1,233	0,652
B 5 121-143	0,016	0,147	0,564	15,146	13,750	1,479	0,696
B 6 143-173	0,017	0,246	0,846	15,465	14,000	1,726	0,739
B 7 173-200	0,015	0,197	0,705	14,880	13,750	1,479	0,652

Предположительно, что при таком ионном составе в почвах присутствуют соли Ca(HCO₃)₂, CaSO₄ (растворимый гипс), MgSO₄, Na₂SO₄, и NaCl. Большая часть солей представлена нетоксичным соединением CaSO₄, которое, фактически, составляет более 80 % твердого остатка. Однако присутствие этой соли в почвенном растворе создает осмотический эффект и затрудняет изъятие почвенной влаги корнями растений. За счет этого потери урожая могут превышать 25 %.

Агрохимические свойства почвы были изучены в верхнем 50-и сантиметровом слое почвы. В соответствии с содержанием органического вещества (ОВ), почвы пахотного слоя оцениваются как «богатые», с 1,6-1,9 % ОВ. Этот показатель имеет более низкие значения ниже по профилю (до 1,2-0,7 %). Содержание N–NH₄ составляет 22–32 мг/кг (ppm) в верхнем горизонте почвы, и

оно увеличивается до 42–51 мг/кг в подстилающих слоях. Содержание фосфора в форме PO_2 изменяется по глубине от низких концентраций (14–16 мг/кг) до очень низких (7–12 мг/кг). Содержание калия (K_2O) изменяется в пределах 100–154 мг/кг, что указывает на низкую обеспеченность калием.

Агротехника

Экспериментальное поле было засеяно кукурузой для силоса, согласно рекомендациям местных экспертов-агрономов (таблица 3).

Таблица 3. Агротехнические приемы при выращивании кукурузы на экспериментальном участке

Дата	Агротехнический прием
03.07.01	Посев
29.07.01	Первый полив
10.08.01	Внесение суперфосфата 250 кг/га + хлорида калия 50 кг/га + мочевины 174 кг/га
14.08.01	Второй полив
07.09.01	Третий полив
15.10.01	Сбор урожая

Кукуруза поливалась по бороздам. Было проведено три полива общей нормой около 300 мм, используя воду со средней минерализацией $3,7 \text{ dS m}^{-1}$ (таблица 4). Время проведения поливов определялось с учетом влажности почв и состояния растений. Организация поливов более подробно описана в работе М. Хорста *и др.*, (2005 г.).

Таблица 4. Режим орошения на экспериментальном участке

Номер полива	Дата полива	Норма полива (мм)	Минерализация воды (dS/m)
1	07.29.01	89	3,7
2	08.14.01	100	3,7
3	09.07.01	107	3,8

Описание водно-физических параметров почв

Гидравлическая проводимость в ненасыщенной зоне [$K(h)$] и кривая зависимости водоудержания, [$\theta(h)$] были определены в полевых условиях с

помощью почвенного монолита (2 x 2 x 2 м), расположенного на экспериментальном участке, согласно методике, описанной в работе Sameira и ее соавторов. (2003 г.). Метод внутреннего дренирующего потока (Green и др., 1986 г.) использовался для определения $K(h)$. Монолит был изолирован по бокам полиэтиленовой пленкой (рис. 2) и оборудован скважиной для использования нейтронного влагомера при измерениях объемной влажности в почвенном разрезе (θ) на глубинах 12,5; 27,5; 42,5; 67,5; 112,5 и 137,5 см и двумя кустами тензиометров для измерения гидростатического напора (H) на тех же глубинах (рис. 3). В начале эксперимента монолит насыщался водой. Первое измерение значений θ и H было выполнено после насыщения монолита. Затем поверхность монолита покрывалась полиэтиленовой пленкой и слоем соломы, чтобы предотвратить испарение и температурные колебания, и начинался эксперимент по внутреннему дренированию монолита. В первый день измерения проводились каждые два часа, затем один раз в день в течение недели, и после этого раз в четыре дня, и, наконец, один раз в неделю в течение месяца. После этого поверхность монолита открывалась, обеспечивая начало процесса испарения. В течение этой части эксперимента измерения производились один раз в день в течение недели и затем один раз в неделю в течение месяца.



Рис. 2. Изоляция почвенного монолита, предотвращающая боковой отток влаги

Гидравлическая проводимость была определена на основе данных по влажности почв и капиллярно-сорбционному (матричному) потенциалу, используя обобщенное уравнение Дарси:

$$\varphi_w(z, t) = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad [1]$$

где: $\varphi_w(z, t)$ – поток почвенной влаги, $K(\theta)$ - функция гидравлической проводимости при влажности почвы φ на глубине z , и H – гидростатический напор, по данным тензиометров.



Рис. 3. Оборудование монолита двумя кустами пьезометров и скважиной для нейтронного влагомера в хозяйстве «Азизбек-1»

Используя уравнение неразрывности для одномерного потока и интегрируя уравнение по глубине от z_i до z_{i+1} , получаем:

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial z = -[\varphi_w(z_{i+1}, t) - \varphi_w(z_i, t)] \quad [2]$$

где: $\varphi_w(z_i, t)$ и $\varphi_w(z_{i+1}, t)$ – потоки почвенной влаги на глубинах z_i и z_{i+1} .

При известном значении содержания почвенной влаги $\varphi_w(z, t)$ можно вычислить левую часть уравнения, а, зная величину одного из потоков, можно вычислить правую часть уравнения. Затем, как только будет определено значение гидростатического напора $H(z, t)$, гидравлический градиент может быть рассчитан для каждого промежутка времени и каждой глубины.

- Зависимость гидравлической проводимости K (см h^{-1}), от гидростатического напора, h (см) описывается следующим образом:

$$K(h) = K_s |h|^{-N_1} \quad 0 \leq |h| \leq |H_2| \quad [4a]$$

$$K(h) = C |h|^{-N_2} \quad |h| \leq |H_B| \quad [4b]$$

где: K_s - гидравлическая проводимость насыщенных почв и h_2 , N_1 , N_2 , и C - коэффициенты, полученные на основе экспериментальных данных.

Полевой мониторинг

Для сбора данных, в целях контроля результатов имитационного моделирования, был организован полевой мониторинг нескольких переменных параметров в течение всего вегетационного периода 2001 года. Полевой мониторинг включал замеры почвенной влажности, глубины залегания грунтовых вод и сбор данных по развитию растений (фенологические фазы, высота растений и их биомасса).

Три экспериментальных участка размером 5х6 м были организованы на поле № 5, где выращивалась кукуруза на силос. Экспериментальные участки были оборудованы двумя кустами тензиометров, скважиной для измерений нейтронным влагомером и скважиной для замеров уровня грунтовых вод до глубины 2,5 м. Замеры потенциала почвенной влаги и влажности почвы проводились каждый день на глубинах 37,5 см, 52,5 см, 87,5 см, 107,5 см и 132,5 см. На глубине 12,5 см влажность почвы определялась весовым методом.

Две грядки кукурузы были отобраны для измерений растений, которые выполнялись два раза в месяц (в начале и в середине месяца). В ходе замеров проводились фенологические наблюдения с целью определения даты начала каждой фазы развития растений. В начале каждой фазы, шесть растений отбирались в каждой грядке для измерения высоты растений, наземную биомассу и глубины развития корневой системы, используя методику, описанную Доспеховым (1985 г.). Урожайность определена при уборке кукурузы.

Результаты

Зависимости водоудержания почв и гидравлической проводимости

На рисунке 5 показана динамика профилей гидростатического напора $H(z, t)$ при проведении полевых экспериментов на монолите. Полевые данные подтверждают ожидаемую динамику изменений гидравлического напора и четко указывают на влияние испарения. В первой половине опыта, когда поверхность монолита была закрыта, наблюдался нисходящий поток влаги в

почвенном профиле. Во второй половине опыта, когда поверхность монолита была открыта, был отмечен восходящий поток влаги вследствие испарения. На рисунке 6 показана динамика влажности пяти почвенных горизонтов в опытах с монолитом (в период с 23 июня (174 день) до 3 сентября (246 день)).

Уравнения [1] и [2] были использованы для расчета данных представленных выше, в соответствии с процедурой, представленной на рисунке 4 для определения значений $K(h)$ и $h(\square)$. Для последнего параметра, значения были уточнены по результатам лабораторных исследований.

На рисунке 7 показаны кривые удержания почвенной влаги, определенные с помощью данных, полученных двумя лабораторными методами, которые были описаны ранее, при сравнении с полевыми данными. Дальнейшая информация предоставлена в статье Стулиной (2003 г.).

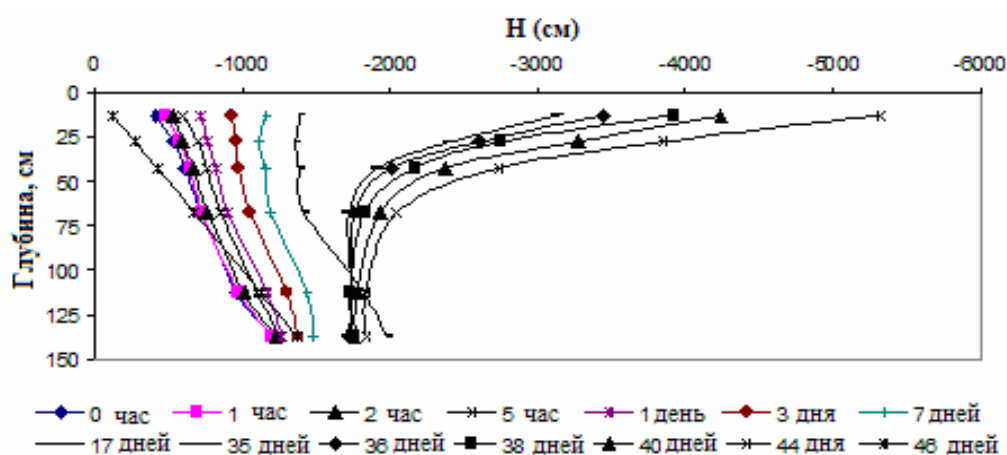


Рис. 5. Динамика профилей гидростатического напора в опыте по дренированию монолита

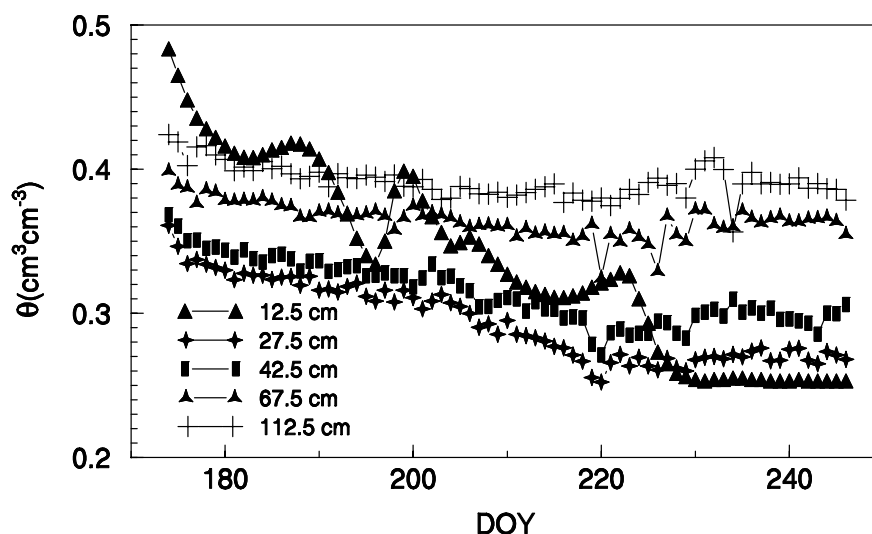


Рис. 6. Динамика влажности почв на пяти глубинах в ходе эксперимента с монолитом

При проведении экспериментов по методике, используемой в Московской лаборатории, получены результаты, сильно отличающиеся от данных полевых наблюдений. Во влажной зоне, до pF 3, значения влажности намного выше, чем значения, полученные в лаборатории, по методике, описанной Klute (1986 г.) или рассчитанным на основе полевых измерений.

Из-за фактов, изложенных выше, заключительная кривая водоудерживающей способности для каждого слоя была получена, основываясь на данных, полученных по методике Klute и полевых экспериментах на монолите (рис. 8). Для всех слоев почвы и всего диапазона влажности почв, модифицированные зависимости Brooks и Corey были интерполированы с экспериментальными кривыми, используя программу CoPlot.

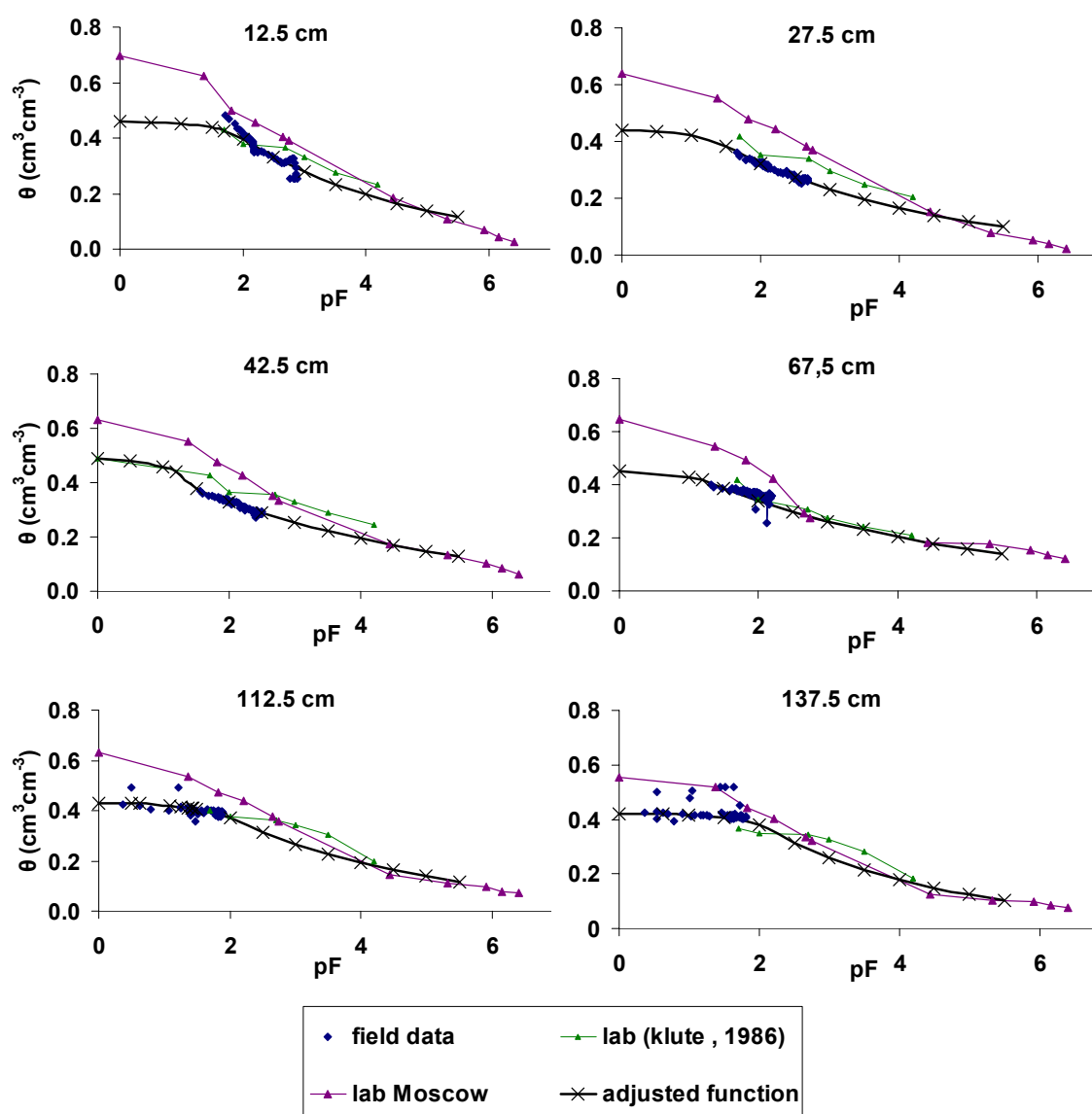


Рис. 7. Кривые водоудержания, рассчитанные по различным методикам

На рисунке 9 показаны зависимости гидравлической проводимости Брукса и Кори, откорректированные согласно полевым данным. Из-за отсутствия значений для диапазона $rF > 3$, зависимости были откорректированы на основании только измерений во влажной зоне, что более важно для исследований, связанных с орошением культур.

Во влажной зоне, близкой по влажности к полному насыщению, слои с более низкими значениями объемной массы отличаются от остальных слоев и имеют более высокое содержание влаги при насыщении, что связано с наличием крупных пор. Для диапазона со значениями rF выше «пузырькового» давления, кривые весьма похожи для всех глубин, указывая на низкую открытую порозность и высокую водоудерживающую способность.

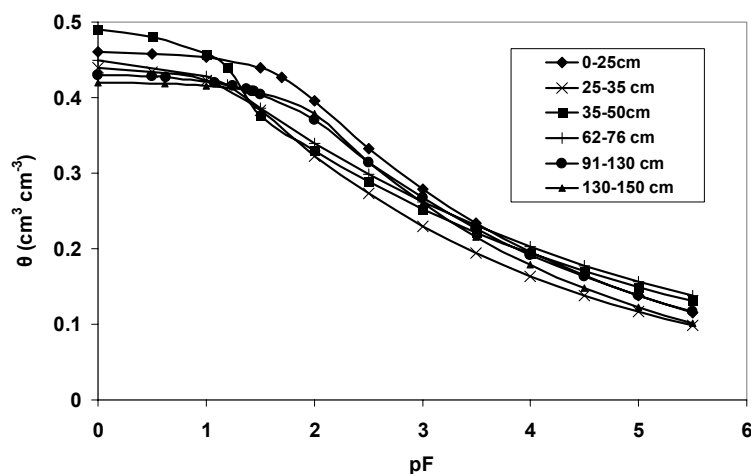


Рис. 8. Последний вариант кривых зависимости водоудержания на основе зависимостей Brooks и Corey

Зависимости гидравлической проводимости аналогичны для всего профиля. Исключения прослеживаются в значениях гидравлической проводимости при насыщении, что говорит о важных отличиях по профилю. Значения 1,8; 0,42; 1,8; 0,25 и 0,42 см/час определены соответственно для слоев 0-20, 20-35, 35-55, 55-90 и 90-130 см.

Динамика почвенной влажности в коренобитаемой зоне

На рисунке 10 показана динамика почвенной влажности в различных глубинах. Глубина залегания уровня грунтовых вод течение вегетационного периода 2001 года приведена на рисунке 11. Поливы вызвали повышение влажности почв по всему профилю, особенно в диапазоне до 52,5 см. Оросительная вода просачивается до уровня грунтовых вод, вызывая его повышение до 0,75 м от поверхности земли после первых двух поливов и до 0,3 м после третьего полива. Ниже глубины 37,5 см влажность почв всегда была выше полевой влагоемкости из-за избыточных поливных норм и значительного влияния близко залегающих грунтовых вод.

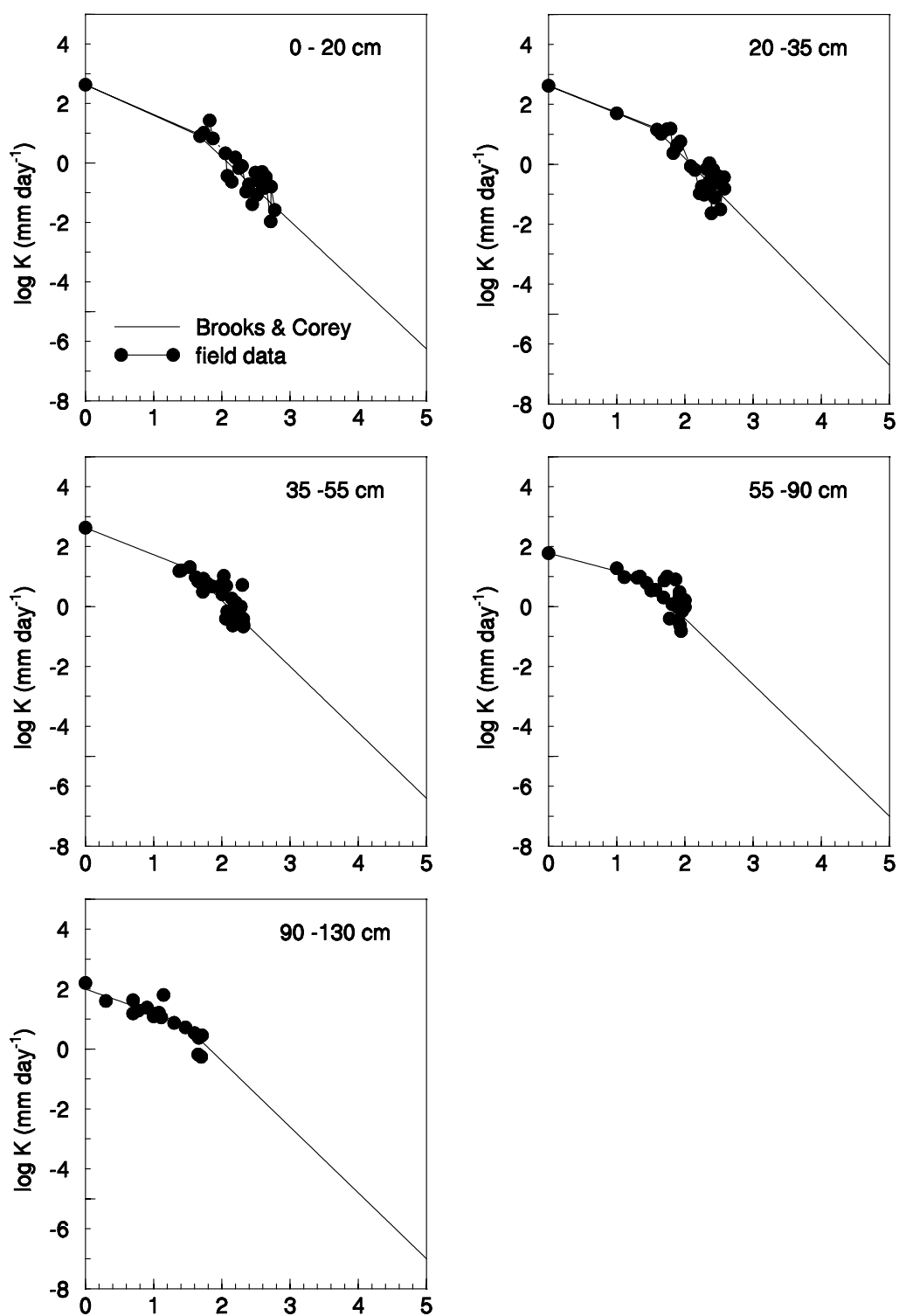


Рис. 9. Зависимости Brooks и Corey, откорректированные согласно полевым данным по гидравлической проводимости

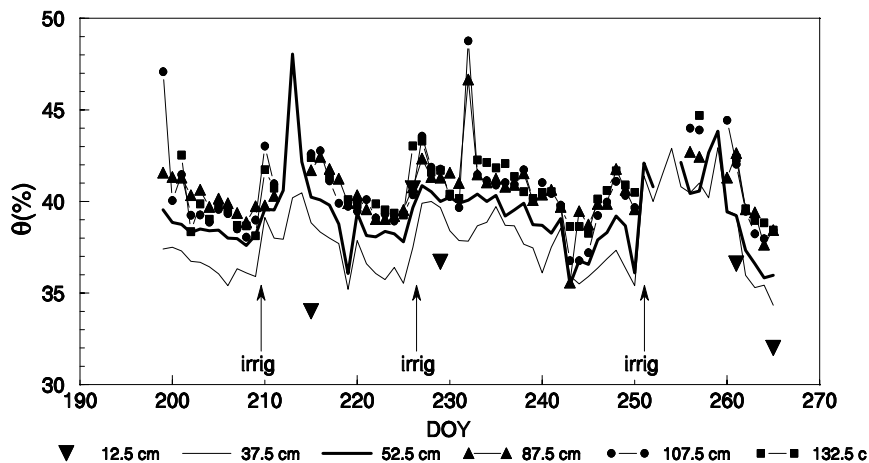


Рис. 10. Замеренные значения влажности почв в период с 18 июля (199 день) до 22 сентября (265 день)

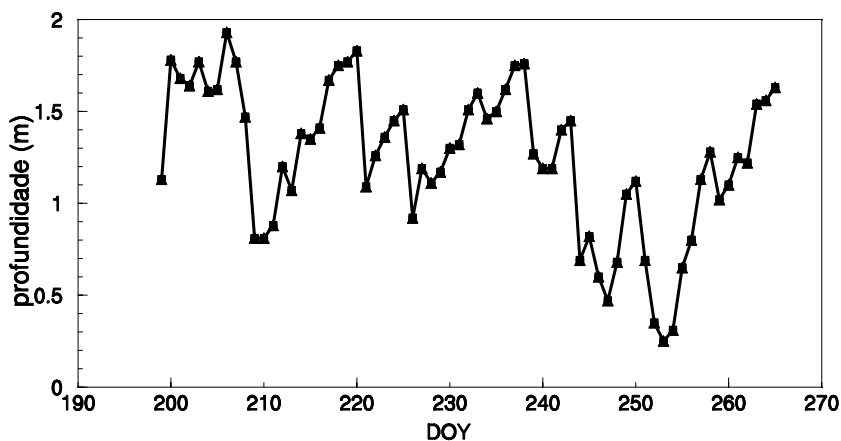


Рис. 11. Глубина залегания грунтовых вод (м) в вегетационный период

Рост и развитие культур

Начальные даты каждой фазы развития растений и их продолжительность были определены в ходе фенологических наблюдений. Эти фазы выделяются следующим образом: развитие 3-4 листиков (212 день); начало репродуктивной фазы – 12 листьев (247 день); начало созревания (269 день).

Высота растений, глубина корневой системы и наземная биомасса приведены на рисунке 12. Урожайность, определенная при уборке урожая, составила 15 т/га.

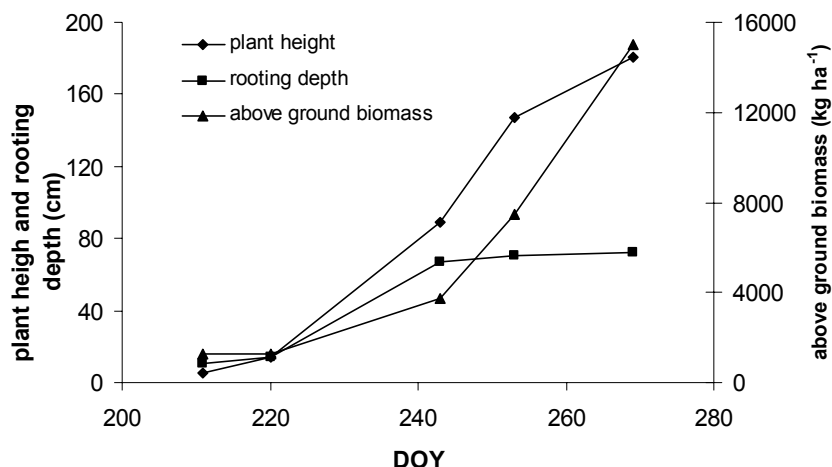


Рис. 12. Развитие кукурузы

Заключение

Определение водно-физических свойств почвы было выполнено с целью уточнения входных параметров для имитационной модели RZWQM.

Эксперименты с почвенным монолитом в поле позволили собрать фактические данные для вычисления гидравлической проводимости.

Метод, разработанный в лаборатории Московского университета для определения кривой водоудержания, не дал положительных результатов. Значения влажности для диапазона влажности близкой к насыщению намного превышали показатели, установленные при полевых исследованиях. Поэтому использовались только данные, полученные в лабораторных условиях по методике Klute (1986 г.).

Зависимости Брукса и Кори хорошо согласуются с полевыми и лабораторными данными для построения кривой водоудержания и гидравлической проводимости, обеспечивая достаточно точное описание гидравлических характеристик почв.

Мониторинг, выполненный в вегетационный период, показал, что содержание влаги в почве было всегда выше полевой влагоемкости, за исключением поверхностного слоя. После каждого вегетационного полива, вода достигла уровня грунтовых вод, вызывая их подъем до глубин близких к поверхности почв. Отсюда можно сделать вывод, что нормы поливов были завышены.

Мониторинг развития растений позволил собрать данные для калибровки модуля роста культур модели RZWQM (описание модуля в сопутствующей статье Стулиной *и др.*, 2005 г.).

Библиография

- Богатырев, Л.Г., Василевская, В.Д., Владыченский, А.С., 1988. Типы почв, их география и использование. В: Ковда, В.А., Розанова, Б.Г., Курс почвоведения 2 (2), Высшая школа, Москва, 368 с.
- Вадюнина, А., Корчагина, З. 1973. Метод проверки физических характеристик почв и грунтов. - М.: Высшая школа.
- Добровольский, Г.В., 1979. Почвы СССР. Справочник для географов и путешественников, Изд. Мысль, Москва, 376 с.
- Доспехов, В.А., 1985. Техника полевых экспериментов. Агропромиздат, Москва, 351 с.
- Стулина, Г., Камейра, М.Р., Перейра, Л.С., 2005. Калибровка модели RZWQM и оценка альтернативных методов управления водой и производством культур (в данном сборнике).
- Умаров, М.У., 1975. Почвы Узбекистана. Изд. ФАН, Ташкент, Узбекистан, 224 с.
- Addiscot, T., Smith, J., Bradbury, N., 1995. Critical evaluation of models and their parameters. *J. Environ. Qual.*, 24: 803-807.
- Ahuja, L.R., Rojas, K.W., Hanson, J.D., Shaffer, M.J., Ma, L. (Eds.), 1999. Root Zone Water Quality Model, Modeling management effects on water quality & crop production. Water Resources Publications, LLC, Colorado USA, 360 pp.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper 3, Colorado State Univ., Fort Collins, CO, USA. 1-15.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2003. Monitoring water and NO₃-N in irrigated maize fields in the Sorraia watershed, Portugal. *Agric. Water Manage.* 60, 199-216.
- Dukhovny, V.A., Sokolov, V.I., 1998. Water and salt management strategies in the Aral Sea Basin. In: Pereira, L.S., Going, J.W. (Eds.) *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage (Selected papers of 1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon)*, E & FN Spon, London, pp. 416-421.
- Green, R.E., Ahuja, L., Chong, S.K., 1986. Hydraulic conductivity, diffusivity and sorptivity of unsaturated soils: field methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 1, 2nd ed.*, Agronomy Monograph 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 771-796.
- Horst, M.G., Shamutalov, S., Pereira, L.S. Gonçalves, J.M., 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agric. Water Manage.* 77: 210-231
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 1, 2nd ed.*, Agronomy Monograph 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 771-796.
- Stulina, G., 2003. Searching water management improvements for Sierozemic soils in Uzbekistan using RZWQM. I. Field studies. In: Tarjuelo, J.M., de Santa Olalla, F.M., Pereira, L.S. (Eds.) *Land and Water Use Planning and*

Management (6th Inter-Regional Conf. Environment-Water, Albacete), CREA – Univ. Castilla-La Mancha, Albacete, paper A-093, CD-ROM.

Глава 10.

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ RZWQM И ПОИСК АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ОРОШЕНИЯ И ВЫРАЩИВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Г.В. Стулина¹⁷, М.Р. Камейра¹⁸, Л.С. Перейра¹⁸

Реферат: Поиск наилучшего варианта использования имеющихся ресурсов для получения максимального урожая сельхозкультур может быть упрощен при применении системного моделирования. В данной статье описываются результаты калибровки модели RZWQM (расчет оптимальной влажности в корнеобитаемой зоне, с учетом качества воды) и её использования в качестве инструмента управления водными ресурсами. Исследования проводились на экспериментальном участке, расположенном в Ферганской долине Узбекистана. Почвы на участке представлены сероземами, участок был засеян кукурузой и поливался водой с повышенной минерализацией. Водно-физические характеристики почвогрунтов и компоненты модели, определяющие развитие растений, были откалиброваны на основе собранных полевых данных. После калибровки модель была использована для прогноза влияния различных режимов орошения, а также норм и сроков внесения удобрений на урожайность. Полевые наблюдения за влажностью почвы, потенциалом почвенной влаги, глубиной залегания грунтовых вод и развитием растений проводились в вегетационный период 2001 года, и полученные данные использовались для калибровки модели. Результаты сравнения натуральных и расчетных данных подтвердили надежность проведенной калибровки в отношении водно-физических характеристик почв и компонентов модели, определяющих развитие растений. Влажность почвы моделировалась для пяти почвенных слоев, при среднем отклонении от измеренных значений в 3,6 %. Прогноз урожайности был составлен с ошибкой в

¹⁷ Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), Ташкент, Узбекистан

¹⁸ Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, Fax: (351 21) 362 15 75; lspereira@isa.utl.pt

13 %. Результаты моделирования для различных сценариев управления процессом выращивания сельхозкультур могут использоваться для дальнейшего агроэкономического анализа и оценки экономической прибыли. Однако другие компоненты модели (например, гидрохимический модуль) должны быть дополнительно откалиброваны на основе данных детальных полевых экспериментов.

Ключевые слова: водно-физические свойства почвогрунтов, кукуруза, калибровка модели, управление орошением, управление плодородием почв, моделирование развития растений.

Введение

Расположенная в бассейне Аральского моря, Республика Узбекистан подвержена процессам опустынивания, что препятствует её устойчивому развитию. Преобладающий на территории республики аридный климат предопределяет необходимость интенсивного орошения выращиваемых сельхозкультур.

В данной статье, как и в работах Хорста и др. (2005), рассматриваются вопросы разработки новых моделей и практических мероприятий по совершенствованию управления поверхностной инфильтрации при поливах сельхозкультур. В этом регионе, до 90 % водных ресурсов используется в орошаемом земледелии. Повышение продуктивности оросительной воды важно для решения проблем, связанных с её дефицитом.

Наряду с другими направлениями работ, моделирование является эффективным инструментом для разработки новых подходов в управлении. Модель расчета оптимальной влажности в корнеобитаемой зоне, с учетом качества воды, (RZWQM) (Ahuja *et al.*, 1999) является комплексной моделью, учитывающей физические, биологические и гидрохимические процессы в почвах и имитирующей рост растений, а также движение воды, питательных веществ и пестицидов в поверхностном слое почв и корнеобитаемой зоне на репрезентативном участке системы возделывания сельскохозяйственных культур. Модель успешно использовалась в нескольких регионах мира (Ma *et al.*, 2001; Cameira *et al.*, 2003). Описано (Cameira *et al.*, 2000) использование модели в сочетании с полевыми исследованиями для изучения водно-физических параметров почв при орошении кукурузы на аллювиальных почвах в бассейне Средиземного моря.

Модель включает дополнительные компоненты, необходимые для моделирования управленческих воздействий (модели транспортировки солей и влаги в макропорах, дренирования закрытыми дренами, движения питательных веществ в почвах, динамики воды и солей, комплексный компонент развития растений), а также сценарии управления гидрохимическими процессами. Она может использоваться для моделирования воздействий различных

сценариев управления сельскохозяйственным производством, включая орошение и внесение удобрений, на урожайность сельхозкультур.

Модель RZWQM позволяет моделирование широкого спектра управленческих действий и сценариев (Cameira *et al.*, 2000, b). При этом оцениваются: структуросберегающая обработка почв с запахиванием растительных остатков в сравнении с обычной пахотой; методы и время внесения удобрений и обработки пестицидами; внесение навоза и альтернативных химических удобрений; способы орошения и дренирования, техника и режим поливов; и различные схемы севооборотов. Вспашка и использование растительных остатков влияют на физические и фильтрационные свойства почв, микрорельеф и состояние поверхности почв, энергетический и водный баланс и смыв химических элементов поверхностным стоком. Вспашка приводит к изменениям в фильтрационных свойствах почв, которые медленно возвращаются к их исходным параметрам под воздействием осадков, способствующем консолидации вспаханных слоев (Cameira *et al.*, 2003).

Компонент модели, описывающий развитие растения, играет ведущую роль в воздействии на состояние моделируемой системы. Затенение листвой растений уменьшает испарение с поверхности почв, в то время как за счет транспирации происходит вынос влаги из почвенных слоев в атмосферу. Сезонный сброс листьев и омертвевшие корни, наряду со стерней после сбора урожая, являются источниками углерода и азота для формирования питательных веществ в почвах. Расчеты продуктивности сельхозкультур и урожая позволяют провести экономическую оценку результатов моделирования.

Надежность результатов моделирования с помощью RZWQM зависит от того, насколько хорошо описан каждый моделируемый процесс, и от точности исходных параметров, необходимых для прогонки модели. Компоненты модели прошли серьезную проверку, были оценены и усовершенствованы при сотрудничестве с несколькими пользователями в США. А именно, следующие компоненты модели: расчет влагопереноса в почвах (Ahuja *et al.*, 1993), перенос пестицидов в почвах (Ahuja *et al.*, 1993, 1996), оценка эвапотранспирации (Farahani & Ahuja, 1996), работы закрытого дренажа (Johnsen *et al.*, 1995), динамика органических веществ / азота (Ma *et al.*, 1998), и компонент развития растений (Nokes *et al.*, 1996).

RZWQM является сложной моделью, которая требует большого объема исходных данных для описания моделируемой системы. Как показывают предыдущие исследования (Cameira *et al.*, 2005), каждый раз, когда она используется в новом регионе, необходима тщательная калибровка модели.

Публикация данной статьи имеет две основных цели. Первая состоит в том, чтобы на основе полевых данных описать наиболее важные аспекты обеспечения необходимых параметров для RZWQM, при применении её в новых почвенных условиях. Вторая - анализ ряда альтернативных подходов в области агротехники, орошения и поддержания плодородия почв, в контексте повышения объемов сельскохозяйственного производства при обеспечении экологического благополучия, для применения в условиях, преобладающих в Ферганской долине Узбекистана.

Методика исследований

Условия проведения экспериментов

Ряд полевых экспериментов был запланирован и проведен в хозяйстве «Азизбек-1» в Ферганской долине Узбекистана, для сбора необходимых исходных данных для модели RZWQM. Эти эксперименты описаны подробно в статье Стулиной и Камейра (2005).

Моделирование

Модели, подобные RZWQM, требуют ввода детального набора параметров. Некоторые из этих параметров не легко измерить или определить. Кроме того, изменчивость естественных условий в системе почва-растение-атмосфера создает дополнительные трудности для оценки некоторых параметров, что предопределяет необходимость калибровки модели для конкретных участков и сельхозкультур. Пользователь сталкивается с дилеммой, какие параметры необходимо калибровать и как это сделать. Итерационный подход при калибровке модели необходим, для учета взаимосвязей между содержанием воды в почве, питательных веществ и урожайностью сельхозкультур. Такой подход уменьшит ошибки при обмене данными между компонентами модели. В данной работе описывается калибровка двух компонентов модели: компонент расчета гидравлических параметров почв и компонент развития растений. Компоненты расчета эвапотранспирации и обеспеченности питательными веществами не изучались.

Исходные профиль влажности и глубина залегания грунтовых вод являлись начальными условиями для решения уравнения Ричардса, которое описывает движение влаги в почве. Интенсивность осадков и потенциальной эвапотранспирации на поверхности почвы определяли условия потока на верхней границе. Потенциальный градиент почвенной влаги использовался в качестве условия на нижней границе.

Калибровка модели

Сначала, данные по гидравлическим характеристикам почвы, полученные в ходе полевых и лабораторных экспериментов (Стулина и Камейра, 2005) были калиброваны без учета отбора влаги корневой системой, используя профили инфильтрации и перераспределения влаги. Прогонка модели RZWQM осуществлялась в обратном режиме для калибровки гидравлических параметров.

Затем компонент развития растений модели RZWQM был калиброван для кукурузы. В этом компоненте были калиброваны два типа параметров. А именно: продолжительность каждой фазы развития растения и параметры, определяемые конкретной сельхозкультурой (таблица 1).

Таблица 1. Фенологические параметры кукурузы на участке исследований (рассчитанные до и после калибровки компонента развития растения)

Параметр	По умолчанию	Кукуруза
1. Минимальное время до начала фазы всходов (сутки)	5	5
2. Минимальное время до появления ростков (сутки)	15	15
3. Минимальное время до начала фазы развития четырех листьев (сутки)	20	25
4. Минимальное время до начала репродуктивной фазы (сутки)	30	30
5. Максимальное потребление N (г/растение/сутки)	5	1,0
6. Отношение потребления N к биомассе (0-1/сутки)	0,12	0,05
7. Удельная плотность листьев (г/LAI*)	11,5	13,5
8. Интенсивность фотосинтеза в фазе цветения (0-1)	0,45	0,85
9. Интенсивность фотосинтеза в фазе формирования завязей (0-1)	0,6	0,80

* Индекс листевой поверхности

Данные параметры отражают влияние определенной агротехники на развитие растений. Первые четыре значения, показанные в таблице 1, используются для корректировки продолжительности каждой фазы развития растения. Увеличение значений параметра 6 приводит к уменьшению биомассы, в то время как увеличение значений параметра 7 приводит к уменьшению общей урожайности сельхозкультуры. Параметры 6 и 7 могут быть откорректированы, чтобы изменить уклон кривых роста биомассы. При увеличении значений параметра 8, урожайность сельхозкультуры также увеличивается, в то время как наземная биомасса сохраняется постоянной. Аналогичные изменения в значениях параметра 9 приводят к тем же результатам, но на более позднем этапе вегетационного периода. Параметры 8 и 9 могут быть изменены для корректировки индекса урожайности. Для этого специфического компонента разработчики модели предлагают, чтобы точность моделирования была в пределах 15 % значений измеряемых переменных, которыми являются наземная биомасса, урожайность и индекс листевой поверхности (Hanson, 1999).

Процесс калибровки был инициализирован, используя по умолчанию значение 5 для параметра 1. После моделирования расчетная биомасса была сопоставлена с фактическими данными. Если ошибка выходила за пределы принятых 15 процентов, параметр 6 корректировался. Затем корректировался параметр 7, чтобы уменьшить размер ошибки приблизительно до 10 %. При необходимости, индекс урожайности корректировался, изменяя параметры 8 и 9. Процесс корректировки может быть проведен повторно.

Использование модели в качестве инструмента управления

После калибровки этих двух компонентов, модель использовалась как инструмент оценки воздействий различных режимов орошения и практики внесения удобрений на урожайность сельхозкультур. С этой целью, были разработаны различные сценарии моделирования. Имитационная модель режима орошения ISAREG (Teixeira & Pereira, 1992) использовалась для разработки сценариев управления водными ресурсами. Эта модель была апробирована с использованием данных, собранных в том же самом хозяйстве Ферганской долины и применяется для обеспечения более совершенного управления орошением на проектной территории (Fortes *et al.*, 2005).

Результаты исследований

Зависимости водоудерживания и гидравлической проводимости почвы

В таблице 2 представлены параметры Брукса и Кори, полученные после калибровки гидравлических характеристик, используя данные по влажности почвы, полученные в ходе эксперимента с инфильтрацией воды в почву и ее перераспределения по почвенному профилю, на незасеянном сельхозкультурами участке. Отправной точкой для калибровки были параметры, рассчитанные на основе полевых и лабораторных данных, полученных в результате экспериментов, описанных в статье Стулиной и Камейра (2005 г.).

Таблица 2. Параметры зависимостей Брукса и Кори для сероземных почв на экспериментальном участке

Горизонт (см)	θ_s ($\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$)	θ_r	K_s (см h^{-1})	h_b (см)	λ	N_2	C	N_1	A
0-25	0,48	0,01	1,9	-14,0	0,20	2,60	1814,2	0	0,003
25-35	0,42	0,01	1,3	-27,0	0,10	2,30	2547,3	0	0,0001
35-50	0,42	0,00	0,8	-33,0	0,10	2,30	2486,9	0	0,0001
50-62	0,42	0,00	0,8	-32,0	0,10	2,30	2317,0	0	0,0001
67-76	0,42	0,00	0,6	-35,0	0,10	2,30	2135,5	0	0,0001
76-91	0,44	0,04	0,6	-23,2	0,10	2,30	825,3	0	0,0001
91-130	0,42	0,03	0,8	-23,0	0,10	2,30	1084,0	0	0,0001

Калибровка гидравлических характеристик выявила необходимость выделения большего числа слоев в почвенном профиле по отношению к первоначально определенному количеству слоев, особенно в диапазоне глубин от 55 до 95 см. Отличие в параметрах зависимости $Q(h)$ отмечается вследствие нового выделения слоев почвы. Калиброванные зависимости $K(h)$ также имеют некоторые отличия от зависимостей, которые были откорректированы

на основе экспериментальных данных, особенно в зоне с влажностью близкой к насыщению, что соответствует макропористости. Фактически, значения калиброванной гидравлической проводимости в зоне насыщения выше чем для всего профиля, за исключением слоя 35-55 см. Эти различия в K_s являются следствием метода отбора образцов, который приводит к некоторому уплотнению, особенно в пахотном слое, ликвидируя макропористость (Cameira *et al.*, 2000, Cameira *et al.*, 2005).

Тестирование модели

Почвенная влага

Сравнение фактических данных по влажности почвы с расчетными данными, после калибровки гидравлических характеристик, приводится на рис. 1 для всех слоев почвы.

Результаты показывают хорошую сходимость расчетных и фактических данных как для верхних слоев почвы, где изменения влажности более заметны в межполивной период, так и для более глубоких слоев, где эти изменения менее заметны. Отклонение между моделируемыми и измеренными значениями составляет, в среднем, 3,6 %, при максимальных отклонениях в 18 %. Хорошие результаты корректировки указывают на то, что параметры модели по гидравлическим характеристикам почвы успешно подобраны. Это также подтверждается хорошим согласованием измеренных и моделируемых значений матричного потенциала для различных слоев почвы (рис. 2).

Как показывает водный баланс корнеобитаемой зоны подпитывание грунтовыми водами значительно. На протяжении почти всего вегетационного периода, в почвенном профиле наблюдались восходящие потоки влаги. Таким образом, восходящие и нисходящие потоки влаги, связанные с грунтовыми водами, составляют важную переменную, которая должна имитироваться в модели, так как она определяет потоки влаги внутри корнеобитаемой зоны. На рис. 3 показаны расчетные потоки влаги в вегетационный период на различных глубинах почвенного разреза.

Развитие растений

После калибровки компонента развития растений, расчеты урожайности сельхозкультур с помощью модели RZWQM дали ошибку в 13 % (фактическая урожайность = 15 т/га; расчетная урожайность = 13 т/га). На рис. 4 показаны расчетные значения высоты растений и накопления наземной биомассы в течение цикла развития растений при сравнении с соответствующими показателями, измеренными в ходе эксперимента. Отклонения между расчетными и фактическими значениями рассматриваются, как незначительными, и дальнейшая калибровка компонента развития растения не нужна.

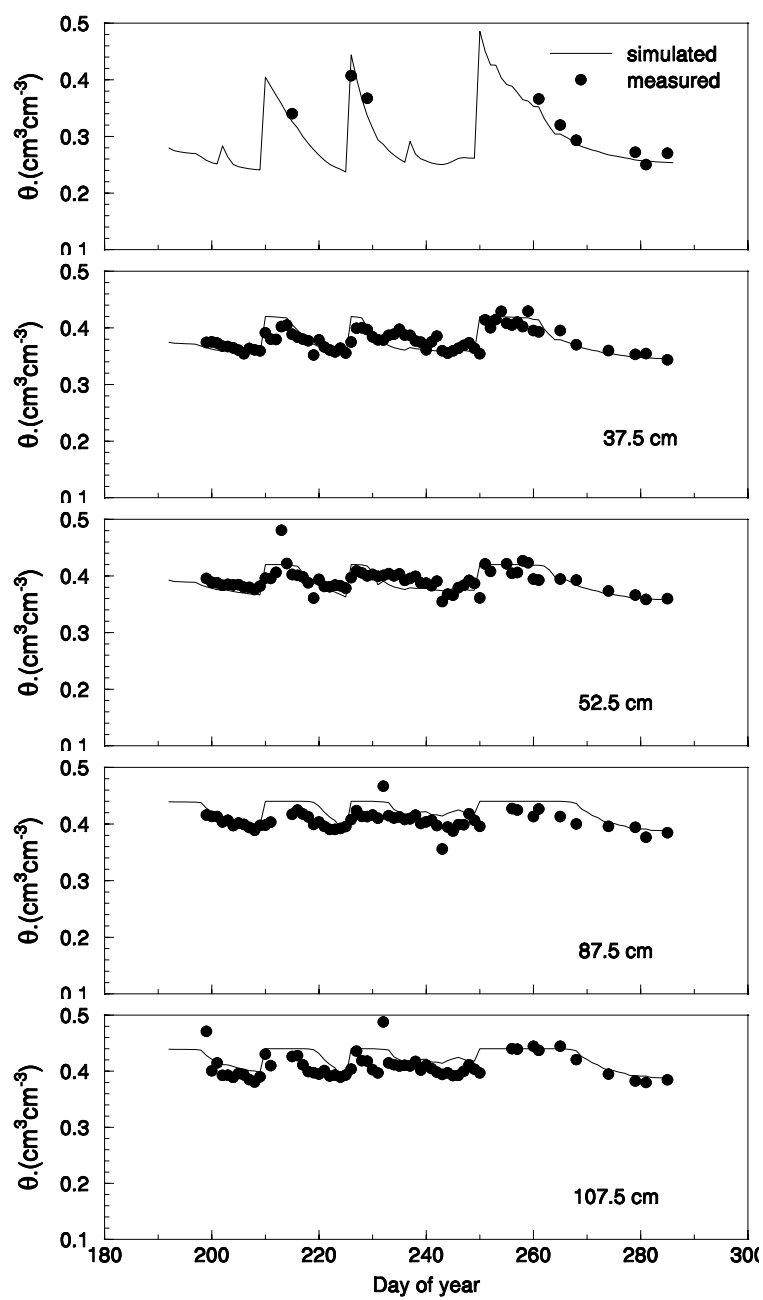


Рис. 1. Сравнение фактических данных по влажности почвы с расчетными данными, после калибровки гидравлических характеристик в компоненте модели

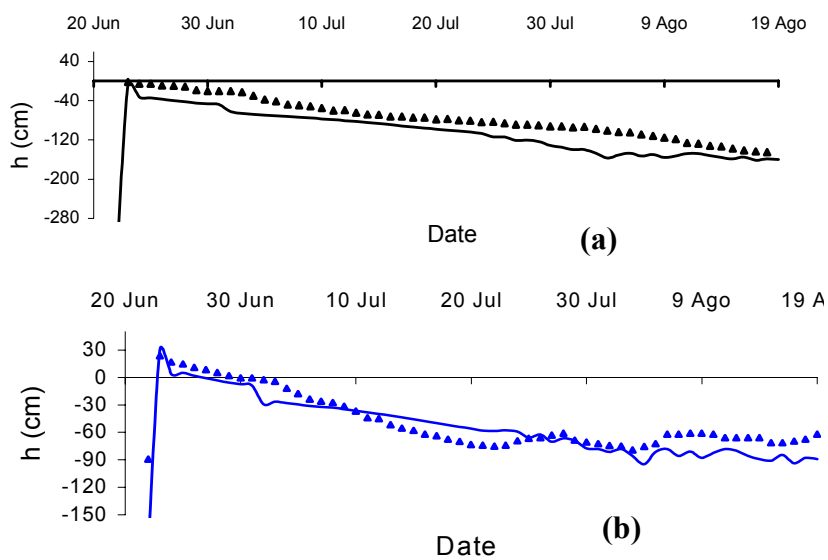


Рис. 2. Сравнение величин матричного потенциала почв фактически замеренных и расчетных (см) на двух глубинах: (а) 88 см и (б) 113 см

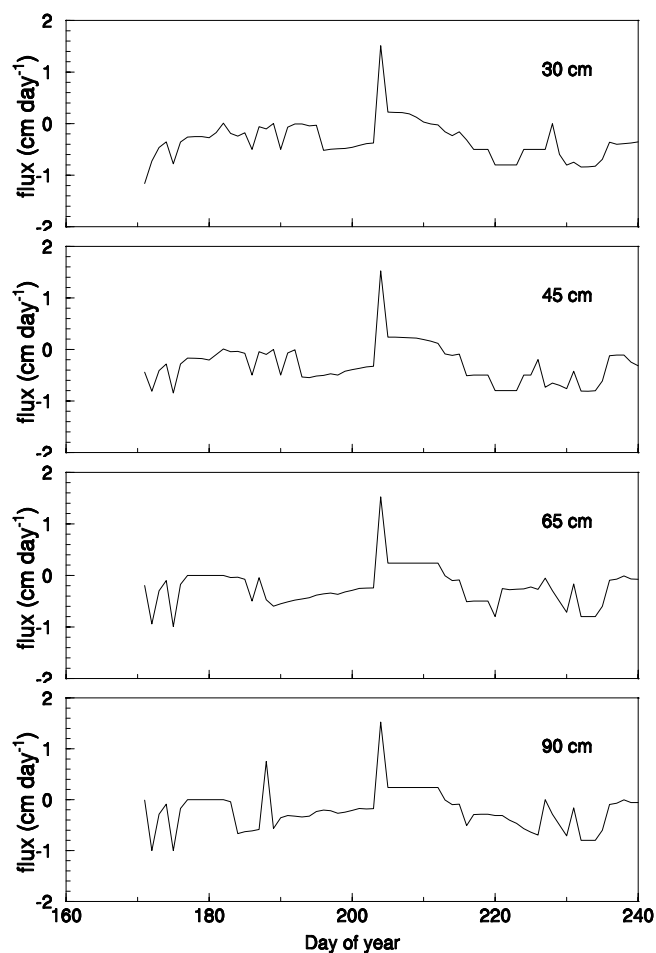


Рис. 3. Расчетные потоки влаги на различных глубинах

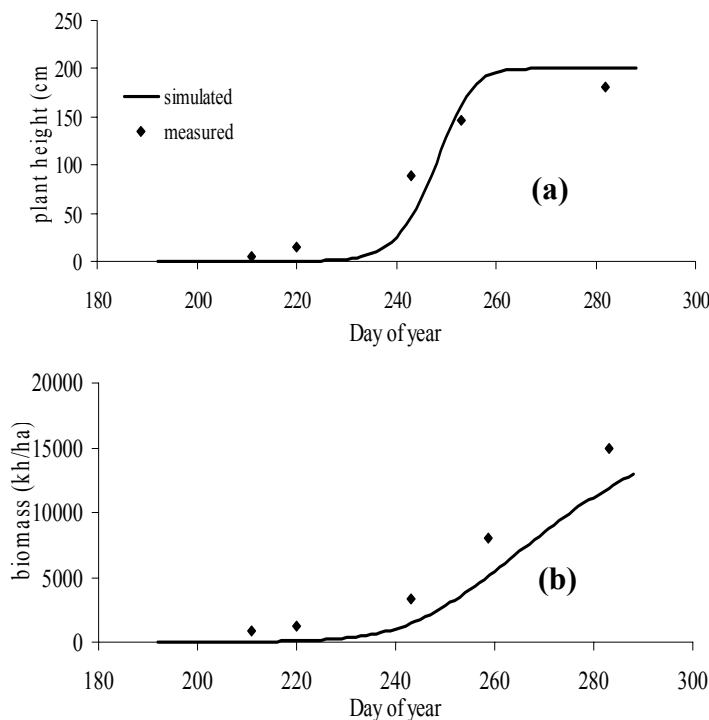


Рис. 4. Расчетная и фактическая высота растений (а) и биомасса (б) кукурузы, выращиваемой на силос

Анализ сценариев

Модель позволяет имитировать широкий круг управленческих сценариев, включая оценку использования пестицидов, норм и времени внесения удобрений, а также режима орошения и техники полива. Эти возможности модели использовались для оценки влияния различных управленческих воздействий на урожайность сельхозкультур.

Рассматривались три способа внесения азотных удобрений: сценарий А1 – комбинированный способ, сценарий А2 – разбрасывание по поверхности почвы и сценарий А3 – инъекционный способ. На рис. 5 показаны результаты моделирования урожайности сельхозкультуры для каждого сценария. Самым эффективным является инъекционный способ внесения удобрений, при котором урожайность сельхозкультуры увеличивается на 5 % по сравнению с вариантом разбрасывания удобрений по поверхности почвы, который наиболее распространен в настоящее время. Различия в результатах применения этих способов незначительны, поэтому усовершенствование техники внесения удобрения не является приоритетным направлением улучшения сельскохозяйственной практики.

Прорабатывались четыре варианта норм внесения азотных удобрений: сценарий В1 – 40 кг/га, сценарий В2 – 80 кг/га, сценарий В3 – 200 кг/га, и сценарий В4 – 400 кг/га. Результаты моделирования урожайности кукурузы для различных сценариев показаны на рис. 6. Увеличение внесения N до 200 кг/га приводит к устойчивому увеличению урожайности. При более высоких нормах внесения азотных удобрений прирост урожайности уменьшается, указывая на то, что увеличение норм внесения N выше 200 кг/га не представляет интереса.

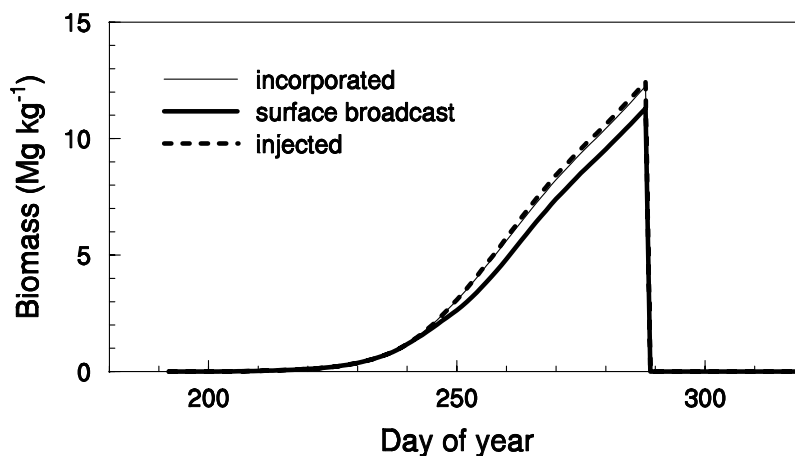


Рис. 5. Результаты моделирования накопления биомассы кукурузой при различных способах внесения азотных удобрений в почву

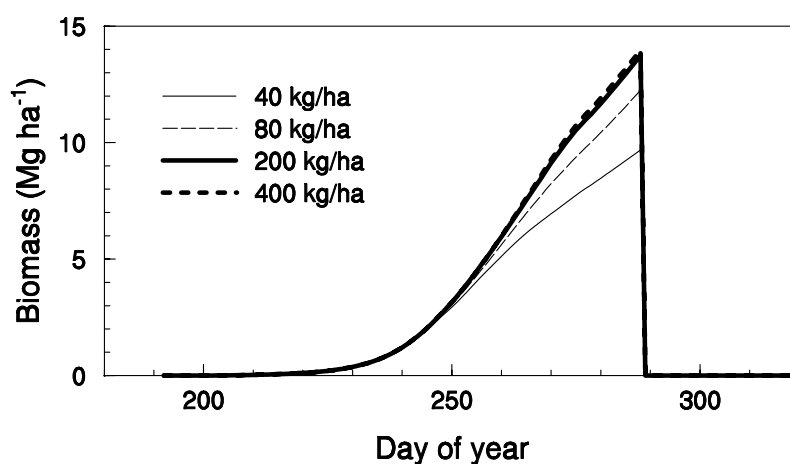


Рис.6. Результаты моделирования накопления биомассы кукурузой при различных нормах внесения азотных удобрений в почву

Моделировались три сценария орошения для определения влияния различных норм поливов на урожайность сельхозкультуры. Сценарий С1

соответствует текущей практике поливов в регионе. Сценарий С2 соответствует улучшенному режиму орошения при достижении максимальной эвапотранспирации и урожайности сельхозкультуры, который был рассчитан с помощью модели ISAREG (Teixeira & Pereira, 1992) и был подтвержден полевыми данными, полученными на том же самом участке. Сценарий С3 - водосберегающий сценарий, также рассчитанный с помощью модели ISAREG, при котором оросительная норма уменьшается на 16 %. Результаты экспериментов, приведенные на рис. 7а, показывают, что улучшенный режим орошения может обеспечить значительное увеличение урожайности, до 13,3 т/га, то есть приблизительно на 10 % по сравнению с обычной практикой, в тоже время рис. 7b показывает, что водосберегающий режим орошения приводит к снижению урожайности кукурузы на 2,45 т/га, то есть, на 20 % меньше чем на контрольном участке.

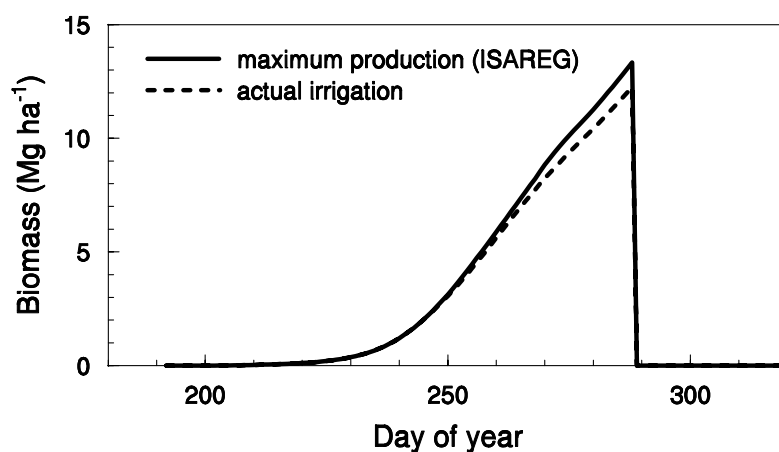


Рис. 7а. Суммарная биомасса кукурузы (кг/га) при улучшенном режиме орошения в сравнении с обычной практикой орошения

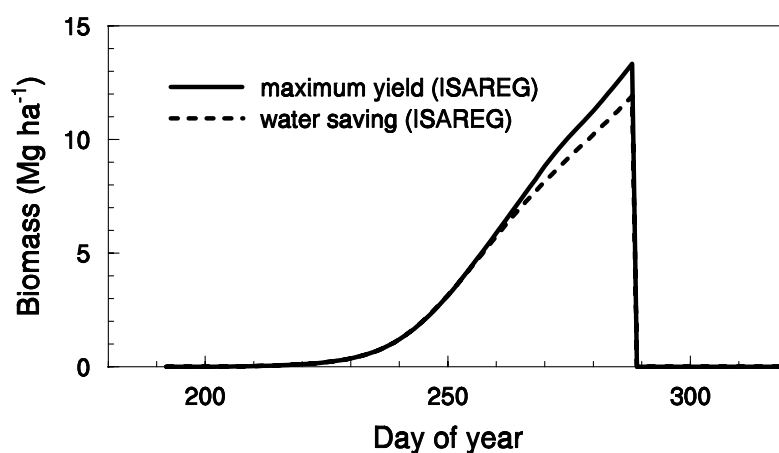


Рис 7b. Расчетная биомасса кукурузы (кг/га) при водосберегающем сценарии орошения и сценарии улучшенного режима орошения

Дальнейший анализ моделирования будет выполнен для разработки усовершенствованной системы агротехнических приемов для орошаемого земледелия в регионе. С этой целью, выполняется калибровка гидрохимического модуля и модуля управления питательными элементами почвы модели RZWQM.

Заключение

Представленные в данной работе результаты подтверждают адекватность методологии определения параметров для модулей гидравлических характеристик почв и развития растений модели RZWQM в условиях Ферганской долины, что стимулирует проведение дальнейших мероприятий по адаптации модели в этом регионе. Однако некоторые затруднения в ее использовании связаны с наличием гипса в почвах. В целом, собранные данные позволили хорошо описать гидравлические характеристики сероземных почв.

В процессе калибровки получены гидравлические параметры почв, в некоторой степени, отличающиеся от данных, полученных в полевых и лабораторных условиях, означая, что традиционные методики измерения гидравлических характеристик почв не описывают поровое пространство с достаточной точностью. Эти параметры, измеренные традиционными способами, должны быть использованы как начальные значения для процедуры «обратной прогонки» модели с целью оценки параметров, при проведении упрощенных полевых экспериментов, таких как наблюдение за инфильтрацией и перераспределением влаги в почвенном профиле незасеянного участка.

В отношении влажности почв, отклонение между расчетными и фактическими значениями составляет, в среднем, 3,6 %, при максимальном отклонении в 18 %. Хорошие результаты калибровки указывают на то, что цель определения параметров модели для описания гидравлических характеристик почв была успешно достигнута. После калибровка компонента развития растений, модель RZWQM оценила урожайность сельхозкультур с ошибкой в 13 % (фактическая урожайность = 15 т/га; расчетная урожайность = 13 т/га).

В данной статье описывается первый опыт использования модели RZWQM в условиях Узбекистана. Результаты подтверждают возможность с помощью модели RZWQM прогнозировать последствия различных агротехнических приемов, включая орошение и внесение удобрений, на урожайность сельхозкультур. При дополнении ее компонентом агроэкономического анализа, модель станет полезным инструментом при принятии решений в секторе орошаемого земледелия Узбекистана для средне- и долгосрочной перспективы, включая выбор мероприятий, которые могут привести к повышению продуктивности земельных и водных ресурсов. Однако дальнейшие и более детальные полевые исследования необходимо выполнить для соответствующей калибровки модели для учета специфических условий Ферганской долины. В частности, необходимо калибровать компоненты модели, рассматривающие минерализацию оросительной воды, агрономические и экономические аспек-

ты, с особым вниманием к гидрохимическому модулю, который обеспечивает учет существующих проблем засоления земель.

Выражение признательности

Мы благодарим за поддержку руководителей программы НАТО по научному партнерству (COUZ21C2001PO).

Библиография

- Стулина, Г.В., Камейра, М.Р., 2005. Полевые исследования водно-физических свойств сероземных почв и развития сельхозкультур с целью калибровки модели RZWQM для ее применения в условиях Ферганской долины (в этой книге)
- Ahuja, L., DeCoursey, D., Barnes, B., Rojas, K., 1993. Characteristics of macropores studied with the ARS Root Zone Water Quality Model. *Trans. ASAE*. 36: 369-380.
- Ahuja, L., Ma, L., Rojas, K., Boesten, J., Farahani, H., 1996. A field test of the RZWQM simulation model for predicting pesticide and bromide behavior. *J. Pesticide Sci.* 48:101-108.
- Ahuja, L.R., Rojas, K.W., Hanson, J.D., Shaffer, M.J., Ma, L. (Eds.), 1999. Root Zone Water Quality Model, Modeling management effects on water quality & crop production. Water Resources Publications, LLC, Colorado USA, 360 pp.
- Cameira, M.R., Ahuja, L., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2000a. Evaluating field measured soil hydraulic properties in water transport simulations using the RZWQM. *Journal of Hydrology*. 236: 78-90.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2000b. Assessment of NO₃-N losses under different management practices using a dual porosity model. In: Mermoud, A., Musy, A., Pereira, L.S., Ragab, R. (Eds.) Control of Adverse Impacts of Fertilizers and Agrochemicals (Proc.Int. Workshop, Cape Town, Oct. 2000), South Africa Com. ICID, Pretoria, pp. 89-99.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation. *Journal of Soil & Tillage Research*, 70: 131-140.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Ahuja, L., Pereira, L.S., 2005. Simulating the Fate of Water in Field Soil – Crop Environment. *Journal of Hydrology* (in press).
- Farahani, H., Ahuja, L., 1996. Evapotranspiration modeling of partial canopy/residue covered fields. *Trans. ASAE*. 39: 2051-2064.
- 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.
- Hanson, J.D., 1999. Generic crop production. In: Ahuja, L., Rojas, K., Hanson, J., Shaffer, M., Ma, L. (Eds.) RZWQM. Modeling management effects on wa-

- ter quality and crop production, Water Resources Publications, LLC, Colorado USA, pp. 81-118.
- Horst, M.G., Shamutalov, S., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agric. Water Manage.* 77: 210-231.
- Johnsen, K., Liu, H., Dane, J., Ahuja, L., Workman, S., 1995. Simulating fluctuating water tables and tile drainage with the root zone water quality model and a new model WAFLOWM. *Trans. ASAE* 38, 75-83
- Ma, L., Ahuja, L.R., Ascough, J.C., Shaffer, M.J., Rojas, K.W., Malone, R.W., Cameira, M.R., 2001. Integrating system modelling with field research in agriculture: applications of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM). *Advances in Agronomy*. 71: 233-292.
- Ma, L., Shaffer, M., Boyd, B., Waskom, R., Ahuja, L., Rojas, K., Xu, C., 1998. Manure management in an irrigated silage corn field: experiment and modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1006-1017.
- Nokes, S., Landa, F., Hanson, J., 1996. Evaluation of the crop component of the root zone water quality model for corn in Ohio. *Trans. ASAE* 39: 1177-1184.
- Teixeira, J.L., Pereira, L.S., 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bulletin* 41(2): 29-48.

Глава 11.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛИВА ПО БОРОЗДАМ НА ЗЕМЛЯХ С БОЛЬШИМИ УКЛОНАМИ

К.М. Кулов¹⁹, А.Ж. Атаканов¹⁹, П.М. Жоошов¹⁹, Н.Ж. Шаршекеев¹⁹

Реферат: Особенности природных условий орошаемых земель Ошской области - большие уклоны (0,02-0,03 м/м). Поэтому главной задачей проведенных исследований являлось повышение эффективности использования оросительной воды за счет ликвидации непроизводительных потерь воды при проведении поливов. Это достигнуто на основе определения оптимальных элементов техники бороздкового полива в конкретных условиях, повышения КПД техники полива и использования моделей оперативного планирования режимов орошения сельскохозяйственных культур. В течение трехлетних исследований эксперименты проводились для 12 различных ва-

¹⁹ Кыргызский научно-исследовательский институт ирригации (КыргНИИирригации), дом 4А, Токтоналиева, Бишкек, 720052, Кыргызстан. Email: kulov@elcat.kg

риантов поливов хлопчатника и 8 вариантов пшеницы. Для оценки ресурсосберегающей технологии полива результаты исследований анализировались по равномерности увлажнения по длине борозды; потерям оросительной воды на сброс, эрозионным показателям. Учет водоподачи на орошаемое поле осуществлялся в голове водозабора по водосливу Чиполетти, а в голове выводной борозды – по треугольному водосливу Томсона. Наблюдения за влажностью почвы проводились с использованием нейтронного влагомера и термостатно-весовым методом. На основе анализа результатов полевых исследований поливов хлопчатника с технологической, экономической и экологической точек зрения при данном уклоне местности необходимо длину борозд назначать в пределах от 120 до 150 м, расстояние между поливаемыми бороздами – 1,2 м и расходы водоподачи в борозду в диапазоне 0,15-0,2 л/с.

Ключевые слова: бороздковый полив, полив в условиях больших уклонов, рекомендации по поливу

Введение

Зона орошаемого земледелия кыргызской части Ферганской долины размещена в межгорных впадинах и долинах, имеет вертикальную зональность и вследствие этого различные природно-климатические условия даже в пределах территории одного района или оросительной системы.

В кыргызской части Ферганской долины основная земледельческая территория расположена на высоте 700-1500 м над уровнем моря, а верхняя граница зоны земледелия доходит до 2800 м. Из-за удаленности территории от океана климат зоны резко континентальный с большими суточными колебаниями температур и неравномерным выпадением осадков. Лето очень засушливое, в июне-августе выпадает только 11 % годовой суммы осадков. Поэтому возделывание сельскохозяйственных культур на большей части земель может осуществляться только при орошении.

В настоящее время, многие фермеры, пришедшие в сельское хозяйство из других сфер деятельности, не имеют достаточных знаний в области мелиорации, не в полной мере используют возможности орошаемого земледелия из-за не соблюдения рекомендуемых агротехнических приемов, режимов орошения, техники и технологии полива сельскохозяйственных культур. Низкий уровень ведения орошаемого земледелия неизбежно приводит к нарушению экологического равновесия окружающей среды, сопровождающегося негативными процессами такими, как ирригационная эрозия, засоление и заболачивание земель и значительным снижением почвенного плодородия и урожайности сельхозкультур.

Доминирующим способом полива в Ошской области традиционно с древних времен является поверхностный полив «диким напуском» или, в лучшем случае, по бороздам. Такой полив имеет ряд преимуществ. Он прост и широкодоступен, не требует привлечения сложной техники. В отличие от полива дождеванием он значительно дешевле, не требует использования дополнительной энергии, экологически чист, обеспечивает лучшее промачивание почвы, не имеет ограничений в фазы цветения растений, его качество не зависит от ветрового режима. При поливе по бороздам гребни между бороздами остаются сухими, что улучшает тепловой и воздушный режим почв, позволяет получать в тех же условиях более высокие урожаи.

Основными недостатками традиционного поверхностного полива являются: его высокая трудоемкость, низкий КПД, неравномерность увлажнения орошаемого поля. Водозабор и водораспределение по орошаемому полю при таком способе полива производятся поливальщиками вручную, учет подаваемой на поле воды, как правило, не ведется, орошение поля осуществляется неравномерно и сопровождается значительными потерями оросительной воды на глубинную фильтрацию и сброс. Неравномерность распределения и излишняя подача воды на поле приводят к значительной эрозии почвенного покрова, повышению уровня грунтовых вод, засолению и заболачиванию земель и снижению плодородия почв. Для того чтобы свести к минимуму недостатки полива по бороздам необходимо обосновать оптимальные значения элементов техники полива: расход в борозду, длину борозды, скорость и время добегания по сухой борозде, время доувлажнения, величину инфильтрации по длине борозды и сброса в конце борозд, выяснить картину эрозионных процессов.

Ландшафты орошаемых земель Ошской области характеризуются большими уклонами (0,02-0,03 м/м). В связи с этим главной задачей проведенных исследований являлось повышение эффективности использования водных ресурсов с минимизацией непроизводительных потерь оросительной воды. Это было достигнуто на основе определения оптимальных элементов техники бороздкового полива, применительно к конкретным условиям, и использования имитационной модели режима орошения сельхозкультур WINISAREG. В течение трехлетних исследований эксперименты проводились для 12 различных вариантов поливов хлопчатника и 8 вариантов поливов пшеницы.

Для оценки ресурсосберегающей технологии полива результаты исследований анализировались по равномерности увлажнения по длине борозды, потерям оросительной воды на сброс, эрозионным показателям. Учет водоподачи на орошаемое поле осуществлялся в голове водозабора по водосливу Чиполетти, а в бороздах - треугольными водосливами Томсона. Наблюдения за влажностью почвы проводились с использованием нейтронного влагомера TROXLER 4300 и термостатно-весовым методом.

Главной задачей проведенных экспериментов было повышение эффективности использования водных ресурсов, ограничение непродуктивных потерь оросительной воды в процессе поливов и сокращение влияния

орошения на деградацию почв и опустынивание. Это было достигнуто на основе определения оптимальных элементов техники полива, планирования процессов орошения с использованием имитационного моделирования, управления поливами на производственных участках и внедрения полученного опыта на оросительных системах путем представлением рекомендаций относительно оптимальных элементов техники полива в зависимости от уклонов поверхности и инфильтрационных характеристик почв.

Характеристики местоположения

Опытный участок площадью 10 га выбран в Карасуйском районе Ошской области на территории частного фермерского хозяйства К.Закирова (координаты: 40° 33 с.ш. и 72° 49 в.д.). Опытный участок расположен севернее метеостанции «Карасу-2» (рис. 1).

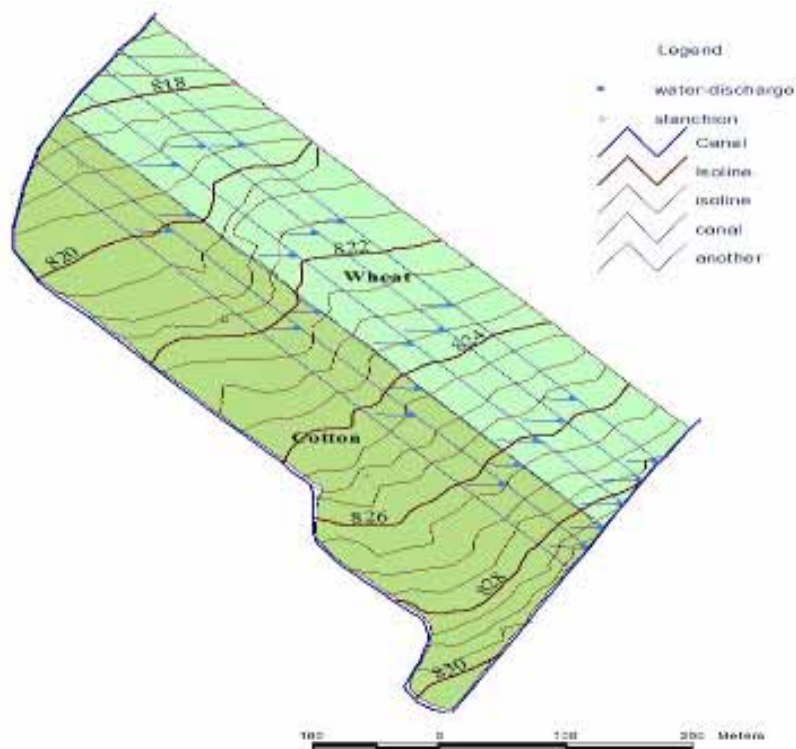


Рис. 1. Схема пилотного участка

Водно-физические свойства почв, определенные для поля хлопчатника, приведены в таблице 1 и для поля с озимой пшеницей на рис. 2.

Таблица 1. Влажность почвы при различных рF
(шурф # 2, поле #1 с хлопчатником, Карасуйский район)

Почвенный профиль	Слой (см)	Объем- ный вес (г/см ³)	Пороз- ность (%)	Влажность почвы (% от объема) при различных рF						Общее со- держание доступной влаги TAW (мм)
				1,7	2,0	2,7	3,0	3,5	4,2	
A 0	0-32	1,35	49	20,39	17,03	15,89	14,90	12,51	6,11	109
A	33-42	1,51	43	30,31	28,15	27,16	24,89	21,43	15,89	123
A-B	42-63	1,46	45	31,62	28,48	27,17	26,20	22,41	15,68	128
B 1	63-82	1,52	43	31,46	28,40	26,14	24,53	21,39	14,86	135
Вк	82-105	1,54	42	27,56	25,20	23,97	22,33	17,32	11,66	135
Вк	105-126	1,49	44	26,08	23,48	21,73	19,71	14,23	9,96	135
B 2	126-150	1,44	46	27,92	23,58	22,18	20,67	15,47	10,03	136
B - 5	150-178	1,44	46	26,77	24,48	24,40	22,19	16,28	11,04	134
B - 6	178-200	1,42	47	26,20	22,22	23,31	19,72	13,29	9,20	130

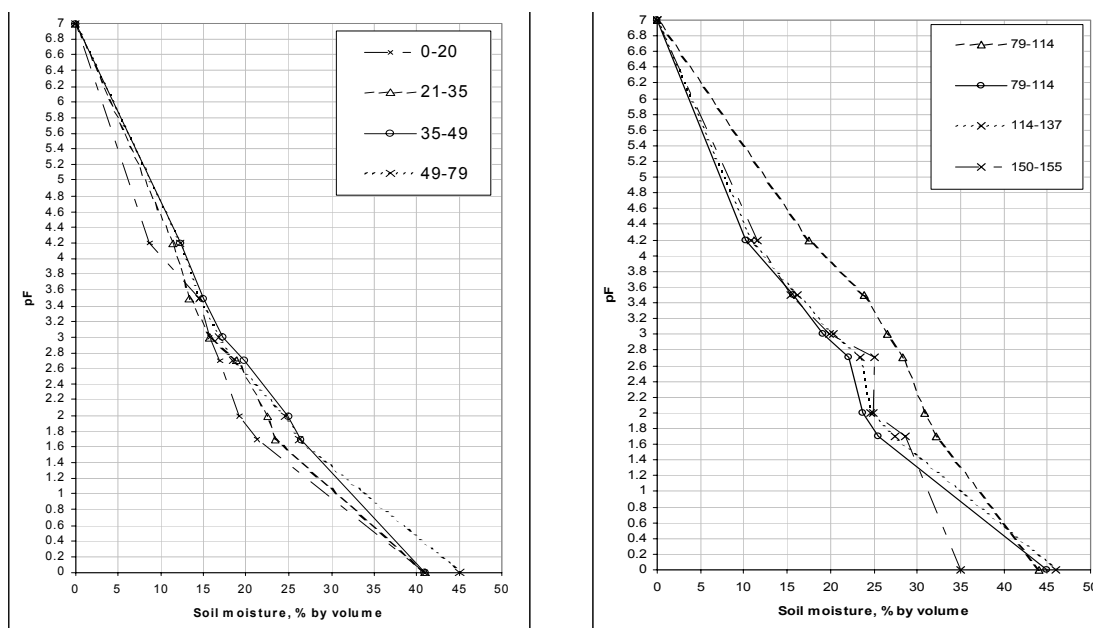


Рис. 2. Кривые удержания почвенной влаги при различных рF
(шурф #1, поле с озимой пшеницей, Карасуйский район)

Скорость инфильтрации на хлопковом поле определялась перед посевом методом цилиндрического инфильтрометра. Несколько повторностей определения скорости инфильтрации производились ежегодно. Результаты этих определений с отражением среднего и средней квадратической погрешности изображены на рис. 3.

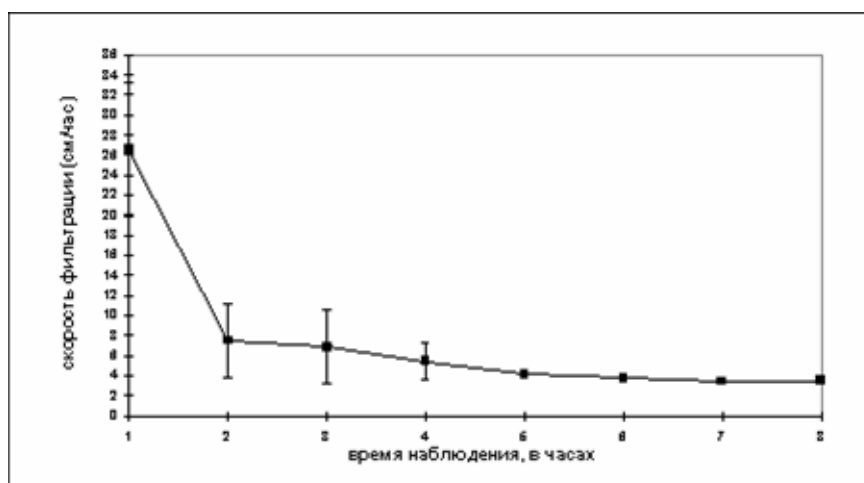


Рис. 3. Интенсивность инфильтрации на почвах поля №1

Эксперименты с орошением по бороздам

При проведении полевых исследований по определению оптимальных элементов техники и технологии бороздкового полива оценивались 12 вариантов полива хлопчатника по бороздам (таблица 2).

Таблица 2. Варианты полива хлопчатника по бороздам

Варианты исследований	Длина борозды, м	Расстояние между бороздами, м	Уклон (м/м)	Расход в борозду, л/с	Способ полива
1.1	60	0,6	0,02	0,45	Полив в каждую борозду
1.2	60	0,6	0,02	0,30	
1.3	60	0,6	0,02	0,15	
1.4	60	1,2	0,02	0,45	Полив через борозду
1.5	60	1,2	0,02	0,30	
1.6	60	1,2	0,02	0,15	
1.7	120	0,6	0,02	0,45	Полив в каждую борозду
1.8	120	0,6	0,02	0,30	
1.9	120	0,6	0,02	0,15	
1.10	120	1,2	0,02	0,45	Полив через борозду
1.11	120	1,2	0,02	0,30	
1.12	120	1,2	0,02	0,15	

Перед началом полива на опытном участке были установлены три водослива для учета поступающих и сбрасываемых вод. Водосливы № 1 и

№ 2 были установлены на участковом канале, а № 3 – на сбросном канале в конце участка. Для контроля расходов воды по всем вариантам устанавливалось по три водослива Томсона на каждой учетной борозде (в начале, в середине и в конце борозды). Перед началом полива поливальщик заготавливал салфетки для армирования оголовков борозд. Затем пленка укладывалась по периметру оголовка борозды путем вдавливание ее краев в землю руками или лопатой по периметру борозды для предотвращения размыва оголовков оросительной водой. В зависимости от расчетного расхода воды в борозду водоподача осуществлялась в течение 13-23 часов. С целью оценки воздействия в некоторых вариантах использовались увеличенные расходы водоподачи.

Оценка продвижения поливных струй проводилась в точках, располагавшихся через каждые 10 м по длине борозд. На рис. 4 показаны типичные кривые добегания поливных струй для второго и третьего поливов.

В таблице 3 приведены данные, относящихся к оценкам средних значений и стандартных отклонений (sd) результатов измерений добегания поливных струй, спада и длительности водоподачи, объема водоподачи и поверхностного сброса, инфильтрации при поливе хлопчатника.

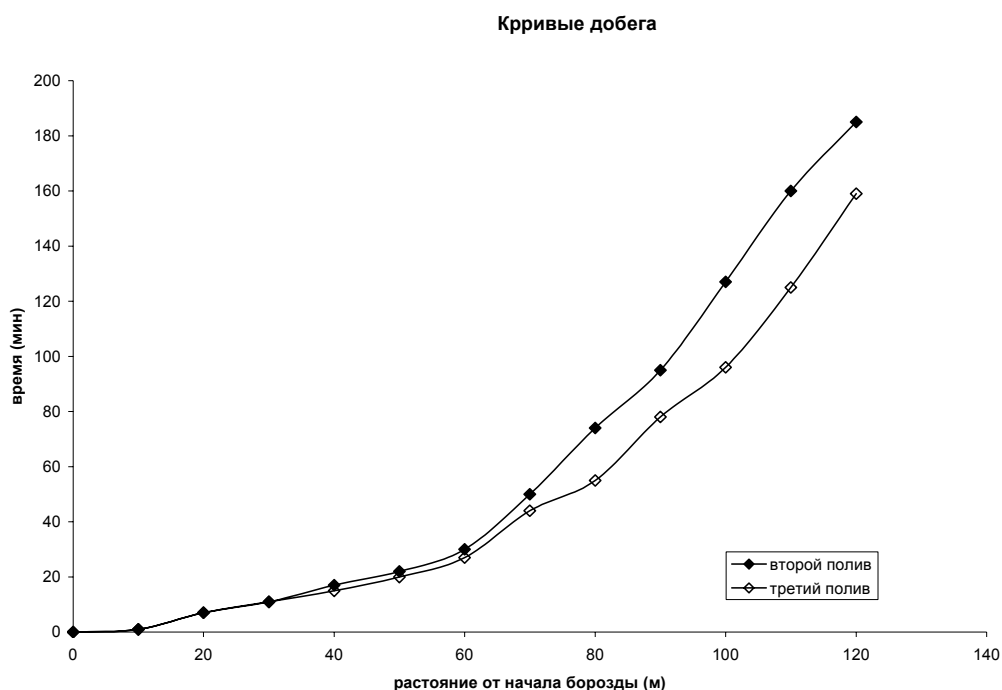


Рис. 4. Кривые добегания поливных струй на втором и третьем поливах, вариант 1.9

Таблица 3. Характеристики второго полива хлопчатника, (17.07.2003), поле # 1

Вариант	Длительность добега (мин)		Спад (мин)	Длительность водоподдачи (мин)	Водоподдача (м ³ /га)	Сброс (м ³ /га)	Инфильтрация (м ³ /га)	Q av. водоподдачи (л/с)	Q av. сброса (л/с)
	L	0.5L							
1.1.	13	3	7	800	6177	5321	856	0.46	0.41
sd	3	2	1	0	155	153	173	0	0.012
1.2.	14	4	7	800	4440	3478	962	0.33	0.27
sd	4	2	1	0	150	168	145	0	0.012
1.3.	39	13	5	800	2087	1143	944	0.16	0.09
s	9	5	1	0	75	130	56	0	0.012
1.4.	14	4	6	1400	5443	4528	916	0.47	0.39
sd	5	1	2	0	66	141	75	0	0.012
1.5.	17	5	4	1400	3772	2940	832	0.32	0.26
sd	3	1	1	0	134	140	142	0	0.012
1.6.	47	19	4	1400	1750	931	819	0.15	0.09
sd	6	4	1	0	117	62	64	0	0.006
1.7.	42	13	9	800	3089	2275	813	0.46	0.37
sd	7	2	2	0	77	21	65	0	0.006
1.8.	51	18	8	800	2289	1447	842	0.34	0.24
sd	17	9	1	0	102	145	76	0	0.020
1.9.	185	46	5	800	1000	140	860	0.15	0.06
sd	28	9	1	0	67	71	51	0	0.006
1.10.	38	10	8	1400	2697	1986	711	0.46	0.36
sd	10	2	1	0	63	56	98	0	0.006
1.11.	49	15	8	1400	1944	1190	754	0.33	0.22
sd	15	6	1	0	67	111	48	0	0.017
1.12.	165	42	4	1400	855	93	763	0.15	0.05
sd	19	5	2	0	34	49	16	0	0.010

Как видно из таблицы 3, продолжительность поливов варьировала от 800 до 1400 мин. Продолжительность полива зависит от технологии полива, в первом случае при подаче воды в каждую борозду полив продолжался 800 мин. Продолжительность полива в 1400 мин требовалась для подачи необходимого количества воды при поливе через борозду. Величина сброса составляет по данным исследования в зависимости от водоподдачи и технологии полива в среднем от 87 % и до 9 %.

Потери на глубинную фильтрацию составляют незначительную величину и варьирует в зависимости от варианта исследования. Из выше приведенной таблицы с характеристиками полива хлопчатника очевидно, что в целях сокращения непроизводительных потерь водных ресурсов и минимизации эрозионных процессов наиболее приемлемым вариантом является полив через борозду с расходом 0,15 л/с и длиной борозды 120 м (вариант 1.12., табл. 3). Применение коротких борозд даже если использовать сбросную воду для полива нижележащих борозд требует больших трудо-

вых затрат и приводит к снижению коэффициента земельного использования

Почвенная влажность исследовалась по 3 бороздам в каждом из вариантов. В каждой из этих борозд для определения влажности почвы с помощью нейтронного влагомера устанавливались по две трубы (в начале и в конце борозды). Расходы воды, подаваемые в поливные борозды, измерялись с помощью водослива Томсона (по три водослива в каждой борозде, как ранее описано). Измерения влажности почвы после полива во всех точках осуществлялись через 4-5 суток нейтронным и термостатно-весовым методами. Измерения влажности почвы до глубины 2-х метров выполнялись только нейтронным методом.

Динамика изменения влажности почвы на опытном участке показана на рис. 5. Как можно заметить, увлажнение почвы при принятых нормах поливов на поле сохраняется в оптимальном режиме. Повышенное увлажнение нижних горизонтов объясняется наличием плотных слоев грунта на глубине около 2-х метров (см. описание шурфа) и накоплением инфильтрационных вод в процессе полива смежных поливных участков.

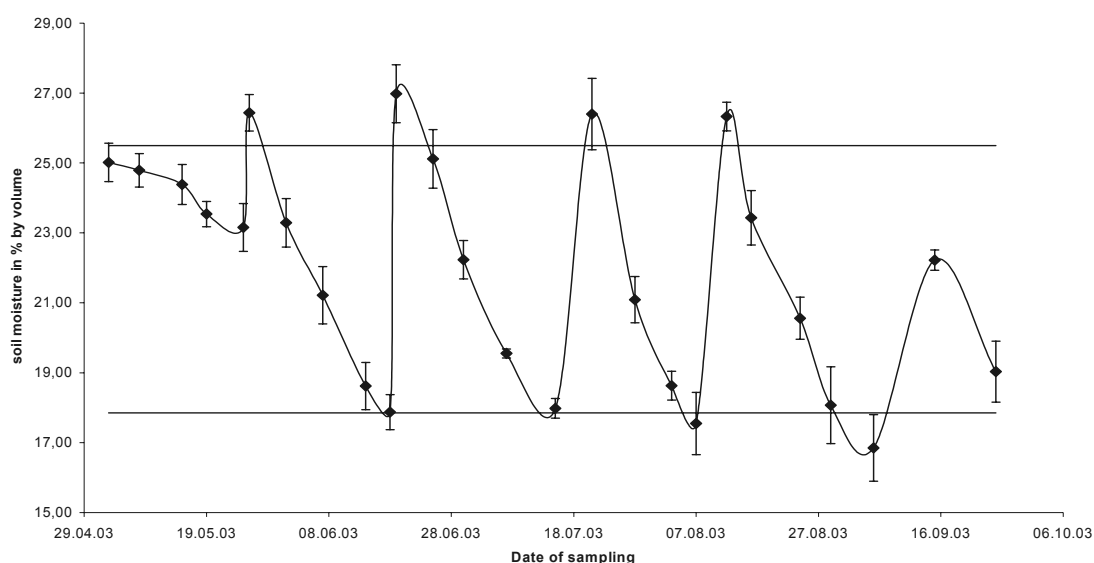


Рис. 5. Динамика изменения влажности почвы на поле с хлопчатником в период вегетации, 2003 г.

Эрозионные процессы изучались в трех створах: в начале, в середине и в конце борозды. При каждом поливе профили борозд измерялись с трехкратной повторностью. Полученные результаты идентичны приведенным на рис. 6 профилям.

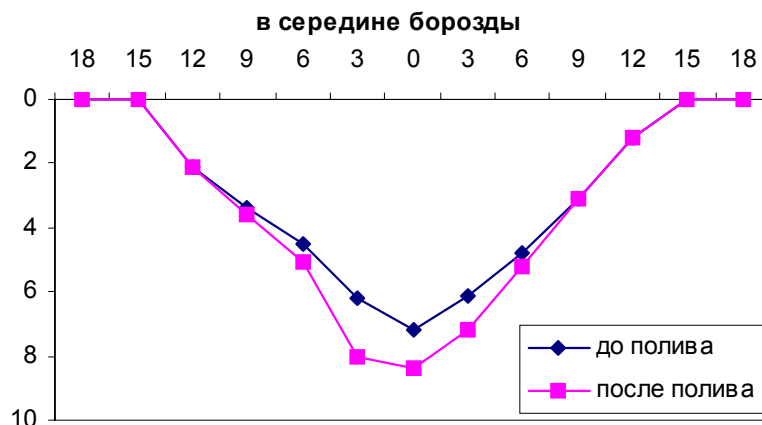


Рис. 6. Поперечный профиль борозды до и после полива

Как показывает опыт, эрозионные процессы происходят по всей длине борозды. Подобные процессы могут происходить, когда расходы в борозду превышают 0,15 л/с. Это можно объяснить влиянием больших уклонов и тонкой текстурой почвы. Согласно нашим исследованиям, существенного уменьшения эрозии почв по длине поливных борозд можно достичь при использовании дискретного регулирования водоподдачи в борозды. Исключить эрозию почвы возможно при применении полимерных добавок.

Урожайность

Для повышения эффективности использования воды в орошаемом земледелии требуется минимизировать непродуктивные эксплуатационные потери на основе установления оптимальных элементов техники полива по бороздам, наряду с повышением эффективности транспортирования и распределения оросительной воды. Результаты трехлетних экспериментов с ранее описанными 12 вариантами поливов представлены в таблице 4.

В 2001 году максимальный урожай 27,6 ц/га был получен на варианте 1.2 (длина борозды 60 м, расстояние между бороздами 0,6 м, расход в каждую борозду 0,30 л/с), В 2002 году также вариант 1.2 обеспечил самый высокий урожай – 32 ц/га, при средней урожайности по всему полю 29 ц/га. В 2003 году максимальный урожай 23,4 ц/га получен на варианте 1.8 (длина борозды 120 м, расстояние между бороздами – 0,6 м, расход воды в борозду 0,30 л/с). Второй результат по урожайности 22,6 ц/га был на варианте 1.2. Если сделать вывод по результатам урожайности, то можно сказать что, вариант 1.2 имеет преимущество перед другими вариантами. Но с экономической и технологической точек зрения этот вариант не является наилучшим. Длина борозды в 60 м невыгодна, т.к. увеличивается число поливных делянок и соответственно увеличивается число временных оросителей, возрастают затраты труда на проведение поливов. Более того, полив расходом

0,30 л/с в каждую борозду приводит к тому, что значительная часть подаваемой воды уходит в сброс, а также при таком большом уклоне борозд происходит эрозия и смыв плодородного слоя почвы.

Таблица 4. Урожайности хлопчатника в зависимости от варианта полива

Вариант	Длина борозды (м)	Расход в борозду (л/сек)	Расстояние между бороздами (м)	Урожайность (ц/га)		
				2001 г.	2002 г.	2003 г.
1.1	60	0,45	0,6	27,1	30,2	21,8
1.2		0,30	0,6	27,6	32,0	22,6
1.3		0,15	0,6	26,9	29,2	21,4
1.4		0,45	1,2	26,3	30,1	20,5
1.5		0,30	1,2	26,8	31,8	21,9
1.6		0,15	1,2	26,4	28,9	19,7
1.7	120	0,45	0,6	26,8	29,8	21,1
1.8		0,30	0,6	27,1	31,9	23,4
1.9		0,15	0,6	26,3	28,4	20,0
1.10		0,45	1,2	25,9	28,6	20,6
1.11		0,30	1,2	26,4	31,7	22,1
1.12		0,15	1,2	26,0	28,2	19,3
Среднее				27,0	29,0	20,0

Анализируя результаты полевых исследований, с технологической, экономической и экологической точек зрения, и используя результаты ранее проведенных исследований, можно рекомендовать при уклоне 0,015-0,025 м/м длину борозд назначать в пределах 120–150 м, ширину междурядья – 0,6 м и расход в борозду 0,15 л/с.

Рекомендации

На основе полевых экспериментов и используя имеющуюся базу данных, возможно определить оптимальные элементы бороздкового полива, водопотребление, режим орошения и оросительные нормы сельскохозяйственных культур в любых условиях Карасуйского района. Значения оросительных норм $M_{бр.поля}$, с учетом инфильтрации за пределы корнеобитаемого слоя и поверхностного сброса определяются как:

$$M_{бр. поля} = M_{нетто} / \eta_{т.п.},$$

где $M_{нетто}$ – оросительная норма-нетто м³/га; $\eta_{т.п.}$ – КПД техники полива, значение которого принимается в зависимости от степени водопроницаемости почвогрунтов и уклона поверхности.

Приведенные в таблице 5 значения КПД техники полива соответствуют элементам техники полива, рекомендуемым нынешними нормативами. Почвенные характеристики, приведенные в таблице 5, устанавливаются по таблице 6.

Таблица 5. Расчетные значения эксплуатационных потерь воды на орошаемых полях при существующем поверхностном поливе

Водопроницаемость почвогрунтов		Диапазон уклонов (м/м)	Потери (%)				Принятый КПД техники полива
Степень водопроницаемости	Индекс		Глубинная фильтрация	Поверхностный сброс	Испарение	Итого	
Сильно водопроницаемые	А	0.05...0.02	33	13	2	50	0,50
		0.02...0.01	29	15	2	46	0,54
		0.01...0.005	26	15	1	42	0,58
		0.005...0.001	23	12	1	36	0,64
Повышенной водопроницаемости	Б	0.05...0.02	23	16	2	41	0,59
		0.02...0.01	22	16	2	40	0,60
		0.01...0.005	19	16	1	36	0,64
		0.005...0.001	16	13	1	32	0,68
Средней водопроницаемости	В	0.05...0.02	18	18	2	38	0,62
		0.02...0.01	15	19	3	37	0,63
		0.01...0.005	13	16	2	31	0,69
		0.005...0.001	11	15	2	28	0,72
Пониженной водопроницаемости	Г	0.05...0.02	14	24	6	44	0,56
		0.02...0.01	15	23	6	39	0,61
		0.01...0.005	17	22	5	35	0,65
		0.005...0.001	15	17	6	31	0,69

Таблица 6. Классификация почвогрунтов по водопроницаемости

Классы	Характеристика водопроницаемости почвогрунтов	Механический состав почвогрунтов	Средняя установившаяся интенсивность инфильтрации (см/ч)	Средний удельный расход впитывание на 100 м борозды, (л/с)
А	Сильная водопроницаемость	Песок	Более 15	Более 1.5
Б	Повышенная водопроницаемость	Супесь	8	0.2
В	Средняя водопроницаемость	Легкий суглинок	4.5	0.1
Г	Пониженная водопроницаемость	Средний суглинок	2.5	0.05
Д	Слабая водопроницаемость	Глина, тяжелый суглинок	Менее 1.5	Менее 0.03

В таблицах 7 и 8 соответственно уклонам даны рекомендуемые длины борозд и расходы в борозды для типов почв, указанных в таблице 6

Таблица 7. Элементы техника полива при постоянном расходе воды в борозду

Характеристика водопроницаемости почвогрунтов	Показатели	Уклоны поливных борозд (м/м)					
		0.05-0.03	0.03-0.015	0.015-0.007	0.007-0.003	0.003-0.001	Менее 0.001
Сильная водопроницаемость	L (м)	50	80	110	180	200	150
	Q (л/с)	0.22	0.35	0.50	0.80	0.90	0.70
Повышенная водопроницаемость	L (м)	80	110	140	220	250	200
	Q (л/с)	0.18	0.24	0.30	0.48	0.55	0.45
Средняя водопроницаемость	L (м)	110	135	160	260	300	250
	Q (л/с)	0.13	0.15	0.18	0.30	0.35	0.30
Пониженная водопроницаемость	L (м)	135	160	185	300	350	300
	Q (л/с)	0.08	0.09	0.11	0.18	0.20	0.18
Слабая водопроницаемость	L (м)	150	180	210	350	400	350
	Q (л/с)	0.05	0.06	0.08	0.12	0.15	0.12

Таблица 8. Элементы техника полива при переменном расходе воды в борозду

Характеристика водопроницаемости почвогрунтов	Показатели	Уклоны поливных борозд (м/м)					
		0.05-0.03	0.03-0.015	0.015-0.007	0.007-0.003	0.003-0.001	Менее 0.001
Сильная водопроницаемость	L (м)	50	80	110	200	250	200
	q1 (л/с)	0.30	0.48	0.03	1.20	2.00	1.00
	q2 (л/с)	0.80	0.92	0.42	1.00	1.00	0.80
Повышенная водопроницаемость	L (м)	80	110	160	260	300	250
	q1 (л/с)	0.22	0.35	0.48	0.90	1.30	1.10
	q2 (л/с)	0.15	0.25	0.34	0.55	0.65	0.50
Средняя водопроницаемость	L (м)	90	140	190	320	350	300
	q1 (л/с)	0.14	0.21	0.30	0.48	0.70	0.60
	q2 (л/с)	0.09	0.14	0.19	0.32	0.35	0.30
Пониженная водопроницаемость	L (м)	120	170	220	350	400	350
	q1 (л/с)	0.10	0.16	0.20	0.33	0.40	0.42
	q2 (л/с)	0.06	0.10	0.12	0.22	0.25	0.20
Слабая водопроницаемость	L (м)	150	200	250	400	450	400
	q1 (л/с)	0.07	0.09	0.12	0.18	0.28	0.24
	q2 (л/с)	0.05	0.06	0.08	0.12	0.14	0.12

Основываясь на анализе полевых исследований орошения хлопчатника по бороздам при данных уклонах поверхности и принимая во внимание технологический, экономический и экологический аспекты предлагается длину борозд назначать в пределах 120–150 м, расстояние между поливными бороздами – 1,2 м, т. е. применять полив через борозду и расход в борозду 0,15 л/с.

Библиография

- Изюмов, В.В., 1986. Справочник по технике и способам полива сельскохозяйственных культур, Киев.
- Мамытов, А.А., Почвы Киргизской ССР, Фрунзе. 1974.
- Отчеты по проекту INCO-Copernicus, Бишкек, 2001-2004 гг.
- Справочник по климату СССР, Киргизская ССР, вып. 32, часть 2. Гидрометеоздат, Ленинград, 1966
- Справочник по климату СССР, Киргизская ССР, вып. 32, часть 4. Гидрометеоздат, Ленинград, 1969
- Агроклиматические ресурсы Ошской области Киргизской ССР. Гидрометеоздат, Ленинград, 1975
- Разработка методики расчета суммарного водопотребления и оросительных норм сельхоз культур для орошаемых земель Кыргызской Республики. Отчет о научно-исследовательской работе, КыргНИИИрригации, 1998
- 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.

Глава 12.

АНАЛИЗ ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛИ И ВОДЫ

С. Нерозин²⁰

Реферат: Развитие орошаемого земледелия в Центральной Азии возможно обеспечить только за счет повышения урожайности сельхозкультур и снижения физических затрат воды на единицу сельхозпродукции. Цель данного исследования - оценка потенциальной и реальной продуктивности земли и воды в Ферганской долине, анализ потерь в урожайности хлопчатника и озимой пшеницы от влияния почвенных, водохозяйственных и технологических факторов и оценка управления ключевыми факторами в фермерских хозяйствах. Обзор фактически сложившейся продуктивности проведен на основе статистических материалов 1990-1995-2000 годов. Исследования проводились на двух пилотных участках хозяйства «Азизбек-1», расположенного в Ахунбабаевском районе Ферганской области (Узбекистан), где выращивались хлопчатник и озимая пшеница. Выбранные участки были оснащены измерительным оборудованием, для каждого поля был составлен агрономелиоративный паспорт, в котором представлены основные агрономические и почвенные характеристики объекта, его особенности и включены справочные данные и рекомендации. Описаны примененные методы исследования и расчетные модели. Для расчета уровней продуктивности земли использовались количественные показатели водно-физических и агрохимических свойств почвы, понижающие коэффициенты на отдельные факторы сельхозпроизводства, что позволило выявить факторы, находящиеся в минимуме, и рекомендовать методы практического воздействия на них (такие как нормы внесения органических и минеральных удобрений под заданный уровень урожая, защита растений от вредителей и болезней, организационные и технологические мероприятия). Были рассчитаны уровни максимально-возможных, потенциальных и действительно-возможных урожаев хлопчатника и пшеницы и сопоставлены с фактически достигнутой на пилотных участках урожайностью. Помимо этого, выявлены причины ограничивающие продуктивность использования земли и воды. Представлена методология определения факторов, находящихся в минимуме и управления ими с целью повышения урожайности сельхозкультур и доходности сельхозпроизводства.

²⁰ Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), Узбекистан, 700187, Ташкент, Карасу-4, дом 11. E-mail: solodky-g@mail.ru

Ключевые слова: динамика продуктивности, урожайность сельхозкультур, оценка факторов, потери урожая, управление сельхозкультурами и водой.

Введение

Обзор фактически сложившейся продуктивности земли и воды проводится на основе статистических материалов 1990-2000 годов по отдельным областям Ферганской долины, которая расположена в аридной зоне Центрально-азиатского региона на территории трех суверенных государств - Узбекистана, Таджикистана и Киргизии. Ферганская долина представляет собой огромную межгорную впадину овальной формы длиной 300 км и шириной около 100 км, которая окружена Кураминским и Чаткальским горными хребтами с севера, Ферганским с востока, Алайским и Туркестанским хребтами с юга. Почвы этой зоны представлены главным образом типичными и темными сероземами, в восточной части автоморфными светлыми сероземами, в западной части преобладают гидроморфные луговые и болотно-луговые почвы пустынной зоны склонные к засолению. Экономика рассматриваемых областей - Андижанская, Наманганская, Ферганская (Узбекистан), Ошская (Киргизия), Согдийская (Таджикистан) в основном направлена на аграрный сектор, т. к. до 70 % населения проживает в сельской местности и их жизненный уровень определяется продуктивностью сельскохозяйственного производства.

Виды сельхозкультур, выращиваемых в Ферганской долине, и структура посевных площадей на орошаемых землях в привязке к отдельным областям представлены в таблице 1. Основными сельхозкультурами зоны являются хлопчатник и озимая пшеница, доля которых, в рассматриваемых областях Узбекистана, составляла в 2000 году 80 % от всех посевных площадей, в Согдийской области 70 % и в Ошской области 43 %.

Расширение площадей под пшеницей является результатом политики «зерновой независимости», принятой правительствами трех государств. В современных экономических условиях пшеница менее прибыльная культура по сравнению, например с хлопчатником, в связи с чем стремление к самообеспеченности зерном привело к существенным финансовым потерям как отдельных хозяйств, так и аграрного сектора в целом. Тем не менее, площади под зерноколосовыми культурами в 2000 году увеличились в 9 раз по сравнению с 1990 годом в Андижанской области; в 8 раз в Наманганской области; в 7 раз в Ферганской области; в 3 раза в Согдийской области, и более чем вдвое в Ошской области. После обретения независимости произошло сокращение общего поголовья скота, сопровождаемое значительным снижением производства кормовых культур в Узбекистане и Киргизии.

Таблица 1. Посевные площади (тыс. га) под основными сельхозкультурами на пахотных орошаемых землях

Область, республика	Годы	Всего	Хлопчатник	Пшеница	Рис	Кукуруза на зерно	Кормовые	Овощи	Бахчевые	Другие
Андижанская (Узбекистан)	1990	236,2	153,6	8,6	3,4	12,3	38,8	13,4	3,2	2,9
	1995	239,3	110,9	52,6	3,6	11,0	33,2	17,4	1,5	5,5
	2000	231,3	106,2	80,0	1,7	4,1	20,7	11,9	0,6	6,1
Наманганская (Узбекистан)	1990	190,2	125,4	10,2	3,9	10,7	21,6	8,3	4,3	5,8
	1995	221,3	94,7	57,6	4,8	3,1	42,9	11,5	1,2	5,5
	2000	220,7	94,3	83,6	4,5	3,8	15,9	9,9	1,2	7,5
Ферганская (Узбекистан)	1990	279,3	165,0	16,2	1,4	16,7	52,3	16,6	4,7	6,4
	1995	304,0	128,6	72,3	1,5	6,6	71,1	14,9	1,7	7,3
	2000	297,5	121,2	116,8	2,4	4,5	30,0	13,2	1,8	7,6
Согдийская (Таджикистан)	1990	253,8	3,4	28,4	3,8	93,1	32,3	80,8	2,2	9,8
	1995	226,4	69,5	99,1	4,3	10,8	34,8	4,7	1,1	2,1
	2000	221,6	60,3	94,7	5,7	11,6	43,2	2,7	1,5	1,9
Ошская (Кыргызстан)	1990	97,4	11,8	10,2	1,8	17,0	50,8	4,7	0,8	0,3
	1995	108,3	13,6	41,4	1,5	10,1	32,1	7,7	0,6	1,3
	2000	110,3	23,5	23,1	1,4	12,7	39,2	8,9	0,5	1,0

Динамику продуктивности сельхозкультур за 1990-2000 годы можно проследить по данным таблицы 2.

Как общую закономерность за 10-летний период для всех представленных областей следует отметить некоторое снижение урожайности овощей (кроме Андижанской области) и кукурузы на зерно, увеличение урожаев люцерны, бахчевых культур, риса (кроме Согдийской области) и пшеницы в Узбекистане.

Эффективность использования воды в орошаемом земледелии оценивается удельными затратами оросительной воды на единицу сельхозпродукции и «оплатой» единицы израсходованной воды урожаем сельхозкультуры. Такая оценка проведена для основных сельхозкультур рассматриваемых нами областей в рамках проекта GEF (2000 г.) (таблицы 3, 4).

Самые высокие затраты оросительной воды на единицу продукции отмечаются в Согдийской области (Таджикистан) - 8,37 тыс.м³ на 1 тонну хлопка-сырца и 3,17 тыс.м³ на 1 тонну зерна пшеницы (таблица 3), самые низкие затраты воды при возделывании хлопчатника отмечены в Ферганской области - 3,15 тыс.м³/т, а при возделывании озимой пшеницы в Андижанской области - 0,84 тыс.м³/т.

Таблица 2. Средняя урожайность сельхозкультур на орошаемых землях (ц/га)

Область, республика	Годы	Хлопчатник	Пшеница	Рис	Кукуруза на зерно	Люцерна	Овощи	Бахчевые
Андижанская (Узбекистан)	1990	28,9	37,4	20,7	52,8	122,8	211,4	114,8
	1995	30,8	43,0	30,9	56,1	345,7	201,3	115,0
	2000	31,8	63,1	31,5	49,2	340,3	219,2	136,9
Наманганская (Узбекистан)	1990	31,1	32,8	11,1	49,9	114,8	284,3	130,3
	1995	31,3	34,4	24,4	47,5	347,1	232,3	133,8
	2000	26,2	33,4	20,1	35,0	314,4	228,3	178,9
Ферганская (Узбекистан)	1990	29,9	28,2	12,7	39,0	102,3	181,9	112,4
	1995	30,6	30,3	20,4	39,4	219,9	169,8	111,4
	2000	29,9	35,8	25,8	33,5	228,9	174,4	118,9
Согдийская (Таджикистан)	1990	27,5	25,3	31,6	33,8	109,4	185,0	90,5
	1995	22,9	24,5	25,9	30,7	101,5	154,4	74,9
	2000	24,9	23,6	27,4	32,6	133,7	163,0	95,7
Ошская (Кыргызстан)	1990	27,6	24,9	17,1	45,3	115,8	190,3	120,2
	1995	23,4	18,6	24,4	33,4	104,0	121,8	65,4
	2000	26,0	24,6	26,4	44,5	129,5	176,3	139,0

Таблица 3. Затраты оросительной воды на единицу сельхозпродукции по областям Ферганской долины (2000 г.)

Культура	Ед. изм.	Узбекистан			Кыргызстан	Таджикистан
		Андижанская обл.	Наманганская обл.	Ферганская обл.	Ошская обл.	Согдийская обл.
Хлопчатник	тыс.м ³ /т	3,19	4,30	3,15	4,45	8,37
Озимая пшеница	тыс.м ³ /т	0,84	1,47	1,40	1,43	3,17

Таблица 4. Продуктивность воды по областям Ферганской долины (2000 г.)

Культура	Ед. изм.	Узбекистан			Кыргызстан	Таджикистан
		Андижанская область	Наманганская область	Ферганская область	Ошская область	Согдийская область
Хлопчатник	т/тыс.м ³	0,31	0,23	0,32	0,22	0,12
Озимая пшеница	т/тыс.м ³	1,19	0,68	0,71	0,70	0,32

Наибольшая продуктивность оросительной воды при возделывании хлопчатника складывается в Ферганской области – 0,32 т/тыс.м³, а наименьшая в Согдийской области – 0,12 т/тыс.м³ (таблица 4). При возделыва-

нии озимой пшеницы наибольшая продуктивность оросительной воды отмечена в Андижанской области – 1,19 т/тыс.м³, а наименьшая продуктивность оросительной воды в Согдийской области - всего 0,32 т/тыс.м³.

Представленный обзор свидетельствует о существенных различиях в использовании земельных и водных ресурсов в Ферганской долине и дает основание для поиска основных ограничений и возможностей в повышении продуктивности земли и воды.

Целями проведенного в 2003 году исследования являлись:

- Оценка потенциальной и фактической продуктивности земли и воды при возделывании сельхозкультур в Ферганской долине
- Анализ зависимостей потерь в урожайности основных сельхозкультур (хлопчатник, озимая пшеница) от почвенно-мелиоративных, водохозяйственных и организационно-технологических факторов сельхозпроизводства
- Совершенствование ключевых факторов методологии управления для повышения продуктивности земли и воды.

Методы и расчетные модели

Агрохимические анализы проводились на почвенных образцах, отобранных в пяти точках каждого участка из пахотного и подпахотного горизонтов. Методы лабораторных анализов являлись классическими, используемыми в отечественной и в зарубежной практике. Удельный вес (или плотность твердой фазы почвы) определялся пикнометрическим методом, механический состав – методом седиментации (Качинский, 1977). Для определения засоленности почв проводились измерения электрической проводимости почвенных суспензий при соотношении объемов почвы: вода равным 1:1. Измерения проводили в дС/м (децисименс на метр) электрокондуктометром с температурным компенсатором. Содержание органического вещества (гумуса) определялось по методу Тюрина (1977), содержание азота нитратов и аммиака, а также доступного фосфора – методом калориметрирования (Мачигин, 1977), обменный калий – на пламенном фотометре.

Определение уровня продуктивности земли проводили по методике программирования урожая (Духовный, Нерозин, 1989), согласно которой расчет максимально-возможного урожая (МВУ) производится по формуле Нечипоровича (1963), потенциального урожая (ПУ) – по основному баллу бонитета (учитывающему тип почвообразования, мощность мелкозема, гранулометрический состав и автоморфность) с введением понижающего коэффициента, зависящего от содержания гумуса, действительно возможного урожая (ДВУ) – с введением понижающих коэффициентов, зависящих от степени засоления, обеспеченности почвы макроэлементами, степени поражения посева болезнями, вредителями, сорной растительностью, степени выровненности фона. Количественные показатели потерь в урожаях

от водного фактора вычислялись с использованием программы CROPWAT, организационно-технологические потери урожая оценивались экспертным путем. Сроки и нормы поливов сельхозкультур рассчитывались с применением модели ISAREG, использующей в качестве основных климатических показателей ежесуточные замеры на поле эвапотранспирации, а также формула Рыжова (1981), основанная на замерах влажности почвы в поле. Продуктивность земли определялась на основе полученного урожая (ц/га, т/га), а продуктивность оросительной воды - отношением урожая сельхозкультуры к затраченному на ее производство объему воды (кг/м³).

Результаты

Основные характеристики пилотных участков

Главным критерием при выборе хозяйства и пилотных участков служили их репрезентативность по почвенно-климатическим и хозяйственным условиям района и относительная равноудаленность от головного канала. Земли участков представлены легкосуглинистыми сероземно-луговыми почвами с тенденциями олуговения и наличия оглеенных горизонтов (таблица 5).

Таблица 5. Основные характеристики пилотных участков в фермерском хозяйстве «Азизбек-1» (Ахунбабаевский район Ферганской области)

Область	Район	Фермерское хозяйство	Площадь пилотного участка, га	Механический состав по ФАО	Объемная масса, г/см ³
Хлопчатник					
Ферганская	Ахунбабаевский	Азизбек	10,0	SL-ZL	1,32-1,45*
Озимая пшеница					
Ферганская	Ахунбабаевский	Азизбек	10,0	SL-ZL	1,31-1,42

* - первая цифра относится к пахотному слою почвы (0-30 см),
- вторая цифра относится к подпахотному слою почвы (30-70 см)

Исследуемые почвы относятся к слабозасоленным в пахотном горизонте и средnezасоленным в подпахотном слое, в составе ионов преобладают Са и SO₄, химический состав солей подтверждает отсутствие процессов осолонцевания.

Агрохимические свойства почвы пилотных участков представлены в таблице 6 и характеризуются низким содержанием фосфора и калия.

Таблица 6. Агрохимические характеристики почвы

Сельхоз-культура	Степень засоления*	Гумус (%)	N-NH ₄ (мг/кг)	P ₂ O ₅ (мг/кг)	K ₂ O (мг/кг)
Хлопчат-ник	слабая/ средняя	1.57-1.07	38.3- 41.4	24.5- 24.3	170- 152
Озимая пшеница	слабая/ средняя	1.40-1.17	43.5- 45.2	21.4- 20.9	169- 170

* здесь и далее первая характеристика относится к пахотному слою почвы (0-30 см), вторая относится к подпахотному слою почвы (30-70 см)

Содержание гумуса в почве варьирует по участкам от 1,57-1,40 % в пахотном горизонте до 1,07-1,17 % в подпахотном горизонте. Количество N-NH₄ несколько выше в нижних горизонтах почвы (41,4 мг/кг - 45,2 мг/кг), в слое 0-30 см содержание растворимого азота ниже - от 38,3 до 43,5 мг/кг.

Агромелиоративный паспорт поля

Агромелиоративная паспортизация полей является разработкой САНИИРИ (Духовный, Нерозин, 1989) и внедряется в сельхозпроизводство с 1990 года. Только за период 1990-1995 годов в различных областях Узбекистана проведена паспортизация хозяйств на площади более 120 тысяч гектар. В рамках проекта CIRMAN-ARAL в хозяйстве «Азизбек-1» были составлены паспорта для пилотных участков, на которых возделывался хлопчатник и озимая пшеница.

Агромелиоративный паспорт поля (АМПП) предназначен непосредственно для фермера или специалистов коллективных дехканских хозяйств и содержит в себе основную агрономическую документацию конкретного участка, а также отдельные справочные данные, нормативные материалы и рекомендации, которые необходимы для разработки научно-обоснованных мероприятий по развитию растениеводства, повышению продуктивности земли, программированию урожайности сельхозкультур, составлению текущих и перспективных планов. Сведения, содержащиеся в электронной версии АМПП, используются при оценке потерь урожаев от различных факторов, при моделировании режима орошения и доз внесения минеральных удобрений и в агроэкономическом анализе сельскохозяйственной деятельности.

Агромелиоративный паспорт поля (рис. 1) содержит 18 страниц и включает следующие основные сведения:

- Площадную оценку поля (брутто, нетто, неудобья, площади занятые дорогами, оросительной сетью, застройками)
- Состав возделываемых культур и уровни их продуктивности
- Основные агрофизические и агрохимические характеристики почв

- Среднемноголетние климатические данные зоны
- Топографическую карту (плоскостное и пространственное представление геометрии поля)
- Карты обеспеченности почвы гумусом, азотом, фосфором, калием, степени засоления и механического состава для пахотного (0-30 см) и подпахотного (30-100 см) горизонтов
- Карту ровности фона посевной площади поля
- Карту фактического и рекомендуемого расположения поливных участков на поле
- Сведения об урожайности сельхозкультур (по отдельным сборам), датам сева, густоте стояния растений
- Сведения об экономической эффективности сельхозпроизводства (валовая продукция, постоянные и переменные затраты, валовая и чистая прибыль).

Информационная часть паспорта заполняется после непосредственной площадной оценки поля, проведения геодезической съемки по характерным створам участка, отбора почвенных образцов в пахотном и подпахотном горизонтах с последующим химическим анализом, сбора и обработки данных систематических полевых обследований наличия сорной растительности, болезней и вредителей.

Практическая значимость паспорта заключается, прежде всего, в том, что большая часть информации представляется в графическом изображении, что позволяет наглядно оценивать характеристики поля. Так, по топографической карте можно определить направления уклонов поля (что трудно установить полевым визуальным обследованием) и в соответствии с имеющимися высотными отметками более правильно выбрать местоположение ок-арыков и разместить поливные участки. Пространственное представление геометрии поля позволяет выделить имеющиеся микроповышения или микропонижения рельефа и устранить такие огрехи при проведении планировки. Использование этих сведений дает возможность избежать проведения лишних объемов планировочных работ и повысить эффективность водораспределения в поле и равномерность его увлажнения. Информация о механическом составе почвы используется для определения степени сложности механизированной обработки земли, сведения о её структурности, водопроницаемости и влагоемкости особенно важны при назначении поливных норм. Карты по засолению пахотного и подпахотного горизонтов позволяют идентифицировать отдельные участки поля, подлежащие промывке, определить площади, на которых должна проводиться такая операция и по степени засоления назначить необходимую промывную норму для каждого контура. Выборочная промывка солевых пятен путем затопления мелких чеков позволяет добиться опреснения таких участков и одновременно существенно экономить водные ресурсы.

Так, по карте содержания гумуса в почве, следует прежде всего определить площади, имеющие низкое плодородие, а затем, согласно приведенным на этой же странице паспорта рекомендациям, рассчитать необходимое количество органических удобрений, которые должны вноситься по контурно в поле. Карты по обеспеченности поля азотом, фосфором, калием, также позволяют вычленить контуры, недостаточно обеспеченные этими макроэлементами, и сбалансировать фон питательных элементов, используя рекомендации, приведенные в паспорте по нормам внесения минеральных удобрений в контуры с различной обеспеченностью NPK (рис. 1).

Карта ровности фона несет информацию о состоянии посева, характеризуя, главным образом, места изреженности растений, или их угнетенности с указанием причин, вызывающих такую ситуацию. Ровность фона определяется прямым обследованием всего поля и замера мерной лентой контуров, отличающихся пониженной густотой стояния растений или отставанием в росте и развитии от общего состояния посева. Экспертным путем устанавливаются причины, вызывающие такие отклонения (степень спланированности микроучастка, близкое залегание грунтовых вод или галечника, солевые пятна, поражение посева вредителями, болезнями или сорняками, низкое качество посевного материала, огрехи при проведении агротехнических работ и др.). Выявленные контуры представлены на карте в цветном изображении, что позволяет по приведенной экспликации определить причины неровности фона и в дальнейшем провести необходимые агротехнические или организационные мероприятия, направленные на их устранение.

Агромелиоративный паспорт поля рассчитан на его использование в течение 10 лет при условии ежегодного пополнения новыми сведениями и является сводом агрономической информацией об участке, позволяющим фермеру выбирать правильные решения при выполнении технологических работ, проводить объективный анализ динамики сельхозпроизводства и совершенствовать культуру земледелия. При необходимости паспорт может дополняться новыми схемами и рекомендациями, направленными на повышение продуктивности земли и воды.

Анализ продуктивности земли

Максимально-возможный урожай (МВУ) может быть получен лишь в идеальных условиях произрастания сельхозкультуры, что реально достигнуть в полевой практике чрезвычайно трудно. Тем не менее, в теории программирования урожаев именно с этого показателя начинаются расчеты продуктивности сельхозкультуры.

Расчет МВУ проводится по формуле Нечипоровича (1963):

$$МВУ = \frac{\Sigma Q_{\text{фар}}}{q} = \eta_{\text{ф}} \cdot K$$

где $\Sigma Q_{\text{фар}}$ - приход фотоактивной радиации за вегетационный период, ккал/см²;

q - калорийность урожая, ккал/кг;

$\eta_{\text{ф}}$ - коэффициент полезного действия фотосинтеза, %;

K - коэффициент перехода от фитомассы к урожаю.

Сведения о приходе фотоактивной радиации (ФАР) за вегетационный период на 1 гектар посевной площади выбирались из наблюдений актинометрических станций Гидрометеорологической службы, коэффициенты, используемые для расчета МВУ, приведены в таблице 7.

Таблица 7. Биологические коэффициенты для расчета МВУ

Культура	Калорийность урожая, ккал/кг	Коэффициент полезного действия фотосинтеза, %	Коэффициент перехода от фитомассы к урожаю
Хлопчатник	4800	3,5	0,20
Пшеница (озимая)	4500	2,5	0,46

В зоне Ферганской долины значения МВУ для хлопчатника составляют 75.5 ц/га, для озимой пшеницы 110 ц/га. Уровень потенциального урожая (ПУ) определялся разницей между МВУ и потерями урожая за счет медленно изменяющихся во времени физических свойств почвы и содержания в ней гумуса. Уровень действительно-возможного урожая (ДВУ) вычислялся по разнице между ПУ и потерями от влияния управляемых факторов сельхозпроизводства (засоление, содержание макроэлементов в почве, пораженность посева сорняками, болезнями, вредителями, степень спланированности поля). От количественных показателей отдельного фактора зависела степень потерь в урожае (понижающие коэффициенты на каждый фактор получены в результате обобщения многочисленных литературных и экспериментальных данных). Наглядно оценить потери в урожаях на пилотных участках от основных факторов сельхозпроизводства в 2003 году позволяют результаты расчетов, изложенные в таблицах 8 и 9.

Таблица 8. Потери в урожайности хлопчатника и пшеницы (ц/га) от основных факторов сельхозпроизводства на пилотных участках (2003 г.)

Показатели и факторы	Хлопчатник	Пшеница
МВУ	75,5	110
Потери от физических свойств почвы	5,8	8
Потери от недостатка гумуса	7,2	12
ПУ	62,5	90
Потери от засоления	3,3	4
Потери от недостатка P ₂ O ₅	7	9
Потери от недостатка K ₂ O	2,6	4,2
Потери от засоренности	2,9	4,8
Потери от болезней	1,6	4,7
Потери от вредителей	4,2	3,9
Потери от неровности фона	1,2	4,1
ДВУ	39,7	55,3
Организационные потери (табл. 9)	8,7	6,7
Фактический урожай	31	48,6

МВУ - Максимально-возможный урожай сельхозкультуры

ПУ - Уровень потенциального урожая

ДВУ - Уровень действительно-возможного урожая

Таблица 9. Организационно-технологические потери урожая (ц/га) на пилотных участках (2003 г.)

Организационно-технологические потери урожая от:	Хлопчатник	Озимая пшеница
Степени обеспеченности посева водой	1,6	1,3
Недостатка сельхозтехники	0	0,5
Недостатка трудовых ресурсов	1	1,4
Использования семян низкого качества	0	0
Снижения нормы высева семян	0	0
Отклонений от зональной технологии	2,6	1,5
Низкого качества технологических работ	3,5	0,9
Потери при уборке урожая	0	1,1
Всего организационно-технологические потерь	8,7	6,7

Потенциальный урожай хлопчатника в среднем по хозяйствам рассматриваемой зоны составляет 62,5 ц/га, действительно-возможный уровень продуктивности - 39,7 ц/га. Наибольшие потери в урожае хлопчатника на пилотном участке были вызваны недостатком гумуса в почве (7,2 ц/га), низким содержанием P₂O₅ (7,0 ц/га) и физическими свойствами почвы (5,8 ц/га).

Потенциальный урожай по озимой пшенице в хозяйствах рассматриваемой зоны составляет 90,0 ц/га, действительно-возможный урожай -

55,3 ц/га, потери от недостатка органики в почве на пилотном участке с озимой пшеницей по сравнению с хлопчатником были существенно выше - 12,0 ц/га, от физических свойств почвы составили 8,0 ц/га, от уровня содержания P_2O_5 - 9,0 ц/га. Организационно-технологические потери при возделывании хлопчатника сложились достаточно высокими 8,7 ц/га, для пшеницы 6,7 ц/га, основные потери связаны с невысоким качеством сельхозработ, отклонениями от рекомендаций зональной технологии и уровнем обеспеченности посева водой.

Количественный уровень потерь в урожае позволяет выделить факторы, наиболее ответственные за снижение продуктивности и выбрать агротехнические или организационные мероприятия, снижающие их негативное воздействие.

Анализ продуктивности воды

Оценками проекта GEF (2002) и последующими оценками использования оросительной воды на полях-индикаторах Ферганской области установлено, что фактический объем подаваемой воды в поле превышает потребности и нормативные объемы, значительная часть воды теряется на сброс и глубинную фильтрацию. Причины завышенных объемов подаваемой воды различаются по отдельным хозяйствам и связаны с водно-физическими свойствами почв, залеганием галечникового горизонта, длиной оросительных борозд, залеганием уровня грунтовых вод, а также не отвечающими требованиями сроками и нормами поливов.

Исследования 2003 года, проведенные в фермерском хозяйстве «Азизбек-1» показали, что сброс оросительной воды с поля под хлопчатником составил 10,2 % от удельной водоподачи, а потери на глубинную фильтрацию за пределы корнеобитаемой зоны - 10,0 %, что в общем итоге составило 20,2 % непроизводительных затрат (таблица 10). На участке занятом озимой пшеницей сброс воды с поля был выше – 13,7 %, а общие потери оросительной воды достигли 23,7 %.

Таблица 10. Эффективность использования оросительной воды на пилотных полях фермерского хозяйства «Азизбек-1» (2003 год)

Показатели	Хлопчатник	Пшеница
Удельная водоподача брутто ($m^3/га$)	7268	7193
Потери на сброс ($m^3/га$)	741	986
Потери на фильтрацию ($m^3/га$)	729	720
Удельная водоподача нетто ($m^3/га$)	5798	5487
Эффективность использования воды на уровне поля (%)	80	76
Количество поливов	6	5

Тем не менее, из сравнительной оценки показателей продуктивности воды за 2002 и 2003 гг. (таблица 11) следует, что уровень управления водой в 2003 году был заметно выше.

Таблица 11. Сравнительная оценка продуктивности воды на пилотных полях фермерского хозяйства «Азизбек-1» (2002-2003 гг.)

Показатели	Ед.измерения		Хлопчатник	Пшеница
Удельная водоподача брутто	(м ³ /га)	2002	9568	9025
		2003	7268	7193
Количество поливов		2002	7	5
		2003	6	5
Затраты воды	(м ³ /кг)	2002	2,59	1,88
		2003	2,34	1,48
Продуктивность воды	(кг/м ³)	2002	0,39	0,53
		2003	0,43	0,69
Повышение продуктивности воды	(кг/м ³)	2003	0,04	0,16
		(%)	2003	10,2

В 2003 году по сравнению с 2002 годом снизилась валовая водоподача на поле с хлопчатником на 2300 м³/га и на поле с озимой пшеницей - на 1832 м³/га, существенно снизились затраты воды на единицу продукции (по хлопчатнику на 0,25 м³/кг, по пшенице на 0,40 м³/кг), повысилась продуктивность использованной воды на 10,2 % на посеве хлопчатника и на 30,2 % на посеве озимой пшеницы. Полученные данные свидетельствуют о возможности сокращения физических затрат воды на поле за счет применения элементов водосбережения и проведения поливов нормами и в сроки соответствующие определенным расчетами с использованием имитационных моделей.

Заключение

Обзор статистических данных за 1990-2000 годы по основным областям Ферганской долины, а также экспериментальные работы НИЦ МКВК, проведенные с целью оценки продуктивности земли и воды в фермерских хозяйствах-индикаторах, свидетельствуют о наличии резерва и реальной возможности повышения эффективности сельхозпроизводства и продуктивности земли и воды. Основными факторами, ограничивающими достижение возможной урожайности на уровне поля в рассматриваемых областях, являются низкие дозы внесения органических и минеральных удобрений; недостаточно эффективные меры борьбы с сорняками, болезнями и вредителями; нарушения сроков проведения отдельных агротехнических операций и низкое качество их выполнения. Мониторинговыми наблюдениями на ряде полей-индикаторов Ферганской долины выявлены нерациональная организация орошения, превышение потребных объемов подаваем

мой воды в поле, неверно выбранные схемы и параметры технологии полива, значительные потери воды на сброс и глубинную фильтрацию.

Оценка уровней продуктивности поля позволяет выявить факторы, находящиеся в минимуме, оценить реальные потери в урожайности возделываемой сельхозкультуры в складывающихся природных, почвенно-мелиоративных, организационных условиях и рекомендовать определенные агротехнические операции, направленные на повышение продуктивности земли. При этом должны учитываться возможности фермера по реализации предложенных мероприятий и на этой основе определяться уровни планируемой урожайности культур.

Используя отдельные элементы теории программирования урожая, интенсивных технологий и методов интегрированного управления сельхозпроизводством, может быть предложен следующий подход к управлению продуктивностью земли и воды на уровне фермерских хозяйств:

- Сбор информации об особенностях поля;
- Составление агро-мелиоративного паспорта поля;
- Расчет уровней продуктивности сельхозкультуры;
- Оценка потерь в урожайности сельхозкультуры от влияния различных факторов;
- Оценка возможностей фермера (финансовые, технические, технологические) управлять факторами, обуславливающими потери урожая;
- Выбор мероприятий, позволяющих снизить негативное воздействие фактора, находящегося в минимуме;
- Составление индивидуальной технологической карты агротехнических работ на период вегетации, учитывающей условия сельхозпроизводства и особенности поля;
- Реализация мероприятий, направленных на повышение урожайности сельхозкультуры и экономию оросительной воды.

Реализация такого подхода на демонстрационных полях, расположенных в Узбекистане, Таджикистане и Киргизии, позволила увеличить урожайность хлопчатника в среднем на 3.5 ц/га, пшеницы на 11.2 ц/га, снизить удельную водоподачу на поле, повысить на 16-88 % продуктивность использования воды, сократить сбросы воды с поля и потери на глубинную фильтрацию за пределы корнеобитаемой зоны. Предполагается, что внедрение описанного подхода возможно через консультационные службы поддержки фермеров.

Библиография

Беседин П.Н., Справочник по хлопководству. Ташкент, Узбекистан, 1981.
 Духовный В.А., Нерозин С.А., 1989. Программирование урожая (системный подход в приложении к мелиорации). Изд-во УзНИИНТИ, Ташкент.

- Качинский Н.А., 1963. Определение механического состава почвы. В книге: Методы агрохимических и агрофизических анализов почвы. Изд-во Кизил Узбекистон, Ташкент.
- Магичин Б.П., 1977. Методы определения азота, фосфора и калия в почве. В книге: Методы агрохимических анализов почвы и растений. Изд-во «Узгипрозем», Ташкент.
- Нечипорович А.А., 1963. Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. Изд-во Наука, Москва.
- Технический отчет проекта GEF, 2000. Подкомпонент А-2, Ташкент, Узбекистан.
- Тюрин И.В., 1977. Метод определения гумуса в почве. В книге: Методы агрохимических анализов почвы и растений. Изд-во «Узгипрозем», Ташкент.
- Horst M.G., Stulina G.V., Mirzaev N.N., 2001. Ways of water conservation. Proceedings of IWMI - SIC ICWC. Tashkent.

Глава 13.

ОЦЕНКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ БОРОЗДКОВОГО ПОЛИВА И ВОДОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ ХЛОПЧАТНИКА

М.Г.Хорст²¹, Ш.Ш.Шамуталов²¹, Д.М. Гонсалвес²²,
Л.С.Перейра²²

Реферат: Для оценки потенциальных возможностей улучшения эксплуатационных характеристик полива по бороздам на хлопковых полях в центральной части Ферганской долины (Узбекистан) проводилась серия оценочных экспериментов с несколькими вариантами полива. Сравнивался полив каждого междурядья с водосберегающим поливом через междурядье при изменении водоподачи от 1,2 до 2,4 л/с/борозда и длинах борозд 130 и 400 м. Результаты оценивались по эффективности использования поливной нормы (E_a), равномерности распределения увлажнения (DU) и фактическим затратам воды на вегетационные поливы. Лучшие характеристики были по-

²¹ Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), Узбекистан, Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11, horst_san@mail.ru.

²² Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, Fax: +351 21 362 1575; lspereira@isa.utl.pt

лучены при поливе через междурядье по длинным бороздам с расходом 1,8 л/с/борозда. На этом варианте E_a и DU превышали 80 % и 83 %, соответственно, и была обеспечена экономия воды за период вегетации от 200 до 300 мм в сравнении с фактическими затратами воды при поливе в каждую борозду. Существенная экономия воды, от 150 до 250 мм за вегетацию, была также достигнута в результате снижения продолжительности водоподачи при поливе каждого междурядья. Кроме того, усовершенствование способа многоярусного повторного использования вод поверхностного сброса при регулировании продолжительности водоподачи соответственно расходу в борозду дало высокие эксплуатационные характеристики полива и экономию за период вегетации более 300 мм воды.

Ключевые слова: полив через междурядье, эффективность использования поливной нормы, длительность полива, равномерность распределения увлажнения, многоярусный полив, водосбережение, управление поливами.

Введение

Бассейн Аральского моря широко известен всему миру, как регион с дефицитом воды, где к аридности и засушливости добавились проблемы опустынивания, вызванные человеческой деятельностью. Нехватка воды усугубляется недостаточно высокими эксплуатационными и управленческими характеристиками оросительных систем (Духовный и Умаров, 1999). Решения вопросов, связанных с этими проблемами, очень разнятся по своей природе, но, предпочтительно, должны быть такими, чтобы минимизировать воздействие и от аридности, и от опустынивания (Pereira et al., 2002a). Данный подход включает управление требованиями на орошение через усовершенствование эксплуатационных характеристик полива на уровне хозяйства (Лактаев, 1978; Джурабеков и Лактаев, 1983; Хорст, 1989).

Исследования были сфокусированы на масштаб фермерского хозяйства в связи с тем, что усовершенствование управления водными ресурсами на транспортирующих и распределительных системах обусловлено сложностью проблем, связанных с образованием частных ферм на базе бывших государственных хозяйств и нуждается в дальнейшем рассмотрении. При этом водосбережение рассматривается в качестве политики и практики, ведущих к снижению затрат водных ресурсов в орошении и концентрируется на совершенствовании управления потребностями хозяйства и повышении продуктивности использования воды (Pereira et al., 2002b).

Цель этой статьи – представить и обсудить альтернативные усовершенствования систем бороздкового полива, которые ведут к меньшему потреблению воды при высоких эксплуатационных характеристиках полива, но не требуют больших инвестиций и могут быть практически применены

фермерами. Описываемые исследования основаны на полевых оценках и экспериментах, проведенных на фермерских полях, а обсуждение результатов поддерживается математической моделью.

Материалы и методы

Полевые эксперименты

Полевые эксперименты проводились в течение вегетационного периода 2001 года в хозяйстве «Азизбек-1» в центральной части Ферганской долины. Оценивались четыре представленных в таблице 1 варианта полива хлопчатника по бороздам. Для всех вариантов ширина междурядья составляла 0,9 м. График поливов устанавливался самим фермером, так как предполагалось оценить нынешнюю практику фермеров для последующего определения усовершенствований, вводимых и в график поливов и в системы орошения по бороздам.

Таблица 1 Варианты полива по бороздам

Варианты полива	Номер борозды	Длина (м)	Уклон (м/м)	Расход (л/с)	Степень уплотнения почвы	Способ полива	Условия дренажа
А	1	130	0,0025	2,4	уплотненная	Полив в каждую борозду	Обычный
	2			1,8	уплотненная		
	3			1,2	уплотненная		
	4			1,8	неуплотненная		
В	5	400	0,0020	2,4	уплотненная	Полив в каждую борозду	Обычный
	6			1,8	уплотненная		
	7			1,2	уплотненная		
	8			1,8	неуплотненная		
С	9	400	0,0020	2,4	неуплотненная	Полив через борозду	Обычный
	10			1,8	уплотненная		
D	11	400	0,0026	1,8	уплотненная	Полив в каждую борозду	Усиленный дренаж
	12			1,8	неуплотненная		

Полив по коротким бороздам (вариант А) можно усовершенствовать путем применения многоярусного полива (рис. 1). При этой компоновке поля концевой поверхностный сброс с группы борозд на первом ярусе собирается в канаву, нарезанную поперек поля, которая действует как собиратель для поверхностного сброса с вышележащих борозд и как распределитель для борозд второго яруса. Одновременно эта канава подпитывается водой из оросителя, расположенного в головной части поля, в объеме, который должен соответствовать разнице между объемами водоподачи и сброса на первом ярусе борозд. Эта вода транспортируется по «шошарыку», нарезанному параллельно орошаемым бороздам (рис. 1). Анало-

гично, для распределения воды на третьем ярусе, сброс со второго яруса собирается во вторую канаву, нарезанную поперек поля и подпитываемую при помощи «шох-арыка». Таким образом, не используется повторно только сброс с последнего яруса.

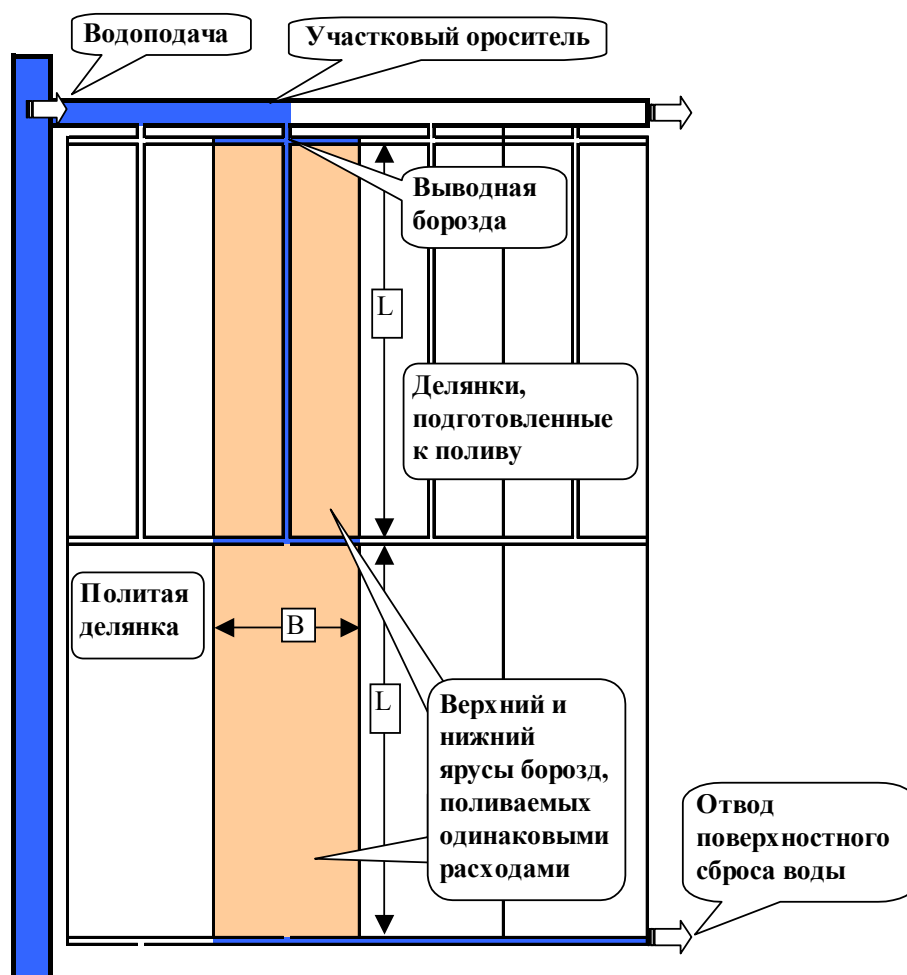


Рис.1. Схема многоярусного полива с повторным использованием сброса для полива последовательных групп борозд

Почвенные характеристики по 7 генетическим горизонтам, выбранным при обследовании почв, представлены в таблице 2. Объемный вес почвы (γ_d , г/см³) определялся по методике, описанной Walker (1989). Содержание почвенной влаги при полевой влагоемкости и влажности завядания (мм/м) определялись в лаборатории при помощи мембранного пресса при $-1/3$ атм. и -15 атм. давления всасывания, соответственно.

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что почвы обладают высокой водоудерживающей способностью и соответствуют поверхностному поливу относительно высокими поливными нормами и с длительными межполивными интервалами.

Таблица 2. Водно-физические свойства почвы

Генетический горизонт	Слой	Объемный вес	Порозность	Полевая влагоемкость	Влажность завядания	Доступная почвенная влага			
(см)	(см)	(г/см ³)	(%)	(м ³ м ⁻³)	(мм)	(м ³ м ⁻³)	(мм)	(м ³ м ⁻³)	(мм)
0-15	15	1,47	43,2	0,38	56	0,21	31	0,17	26
15-35	20	1,40	44,0	0,32	64	0,17	34	0,15	30
35-50	15	1,32	48,8	0,33	49	0,19	29	0,14	20
50-62	12	1,28	50,4	0,34	41	0,19	23	0,15	18
62-76	14	1,41	45,0	0,36	50	0,19	27	0,17	23
76-91	15	1,45	43,9	0,37	55	0,19	29	0,17	26
91-100	9	1,52	42,8	0,38	34	0,20	18	0,18	16
0-100	100	1.40	45.4	0.35	348	0.19	189	0.16	159

Процедуры полевой оценки

Методология, использовавшаяся для оценки полива по бороздам, следовала методике Merriam and Keller (1978), адаптированной Calejo et al. (1998). Измерения включали оценки: условий спланированности поля, расходов в борозды, профилей поперечного сечения борозд, добегов и спадов поливных струй, гидравлической шероховатости и инфильтрации.

Отклонения фактических высотных отметок от контрольных измерялись с использованием сети квадратов 20 x 20 м на поле размером 400 x 250 м. Стандартное отклонение разности полевых отметок S_{dp} (м) вычислялось как:

$$S_{dp} = \left[\sum_{i=1}^N (h_i - h_{ti})^2 / (N-1) \right]^{0.5} \quad [1]$$

где h_i – фактические отметки (м) поля в точках сети i ; h_{ti} – контрольные отметки (м) в тех же точках соответствующие линии среднего уклона и N – количество замеров.

Наряду с S_{dp} также использовался показатель относительной неравномерности Δ_y (%), применявшийся Li & Calejo (1998):

$$\Delta_y = \frac{100 \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}|}{NL} \quad [2]$$

где y_i – наблюдаемые отметки (м); \hat{y} – желаемая отметка (м) в той же точке i , соответствующая подогнутой линии уклона; N – количество замеров; L – длина поля (м).

Расходы в борозду измерялись при помощи переносных водомерных лотков, модифицированных водосливов с широким порогом (Replogle and Bos, 1982; Clemmens et al., 2001), которые размещались в голове, центре и концевой части оцениваемых соответственно таблице 1 борозд (рис. 2). В первые минуты водоподачи в борозды наблюдался большой разброс расходов. Поэтому, пока не устанавливался стабильный расход, расходы измерялись каждые 1 или 2 минуты. После стабилизации интервалы между измерениями увеличивались до 20-30 минут; а в случае внезапных изменений расхода водоподачи из канала, измерения проводились более часто, пока расход водоподачи не стабилизировался.

Расходы в борозду характеризовались средневзвешенным по времени расходом Q_{avg} (л/мин):

$$Q_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N A_{qi}}{t_{ap}} \quad [3]$$

где A_{qi} – объем водоподачи (i) в течение интервала времени от t_i до t_{i-1} , вычисленный так:

$$A_{qi} = 30(Q_i + Q_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad [4]$$

и где t_i и t_{i-1} – время двух последовательных замеров расхода (мин), отсчитываемое с момента начала полива; Q_i и Q_{i-1} – измеренные расходы в борозду (л/с) в те же моменты времени t_i и t_{i-1} ; N – число замеров расхода; и t_{ap} – общая продолжительность водоподачи (мин).



Рис. 2. Портативные водомерные лотки в голове группы борозд

Вариации расходов в течение полива оценивались для каждой борозды суммой квадратов отклонений текущего замера расхода от среднего расхода Q_{avg} :

$$SSD_q = \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_{avg})^2 \quad [5]$$

Площадь поперечного сечения борозд измерялась при помощи бороздкового профилометра (Walker and Skogerboe, 1987). Замеры производились в голове борозды до и после полива. Замеры в каждом створе усреднялись и поперечное сечение описывалось уравнением параболы, как функции от глубины борозды.

Длительности добега и спада (t_{adv} и t_{rec}) измерялись в створах, расположенных через каждые 10 м в случае коротких борозд и через каждые 20 м для длинных борозд. Время спада записывалось в тот момент времени, когда вода полностью впитывалась в почву в наблюдаемом створе; однако, когда из-за отдельных неровностей ложа борозды вода не впитывалась в течение длительного времени, t_{rec} записывалось при полном впитывании воды в точке, близкой к створу замера. Таким образом, замеры времени добега были более точными, чем время спада, последнее зависело от субъективных факторов наблюдателя.

Коэффициент гидравлической шероховатости Маннинга n ($m^{-1/3} c$) рассчитывался из замеров площади поперечного сечения борозды, расхода, глубины потока и ширины поверхности воды по урезу:

$$n = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S_0^{\frac{1}{2}}}{Q_{inf}} \quad [6]$$

где Q_{inf} - расход в борозду (m^3/c); A – площадь поперечного сечения борозды (m^2); R – гидравлический радиус (м); и S_0 – гидравлический градиент, который предполагается равным уклону борозды (м/м).

В этом исследовании использовалось уравнение инфильтрации Костякова, принятое в модели SIRMOD (ISED, 1989):

$$Z = k\tau^\alpha + f_0\tau \quad [7]$$

где Z – суммарная инфильтрация на единицу длины борозды (m^3/m); τ – эффективное время впитывания (мин); α и k – эмпирические параметры; и f_0 – эмпирическая основная скорость инфильтрации ($m^3/мин/м$). Параметры инфильтрации рассчитывались с использованием обратного метода (Katorodes et al., 1990), в котором наблюдаемые данные времени добега и спада сравниваются с вычисленными моделью SIRMOD. Наилучшие значения параметров получались после нескольких итераций, осуществляемых

с целью минимизации суммы квадратов отклонений наблюдавшихся времени добега и времени спада от моделируемых, как предлагалось Calejo et al. (1998). В течение процедуры поиска параметров инфильтрации, наиболее близких к полевым данным, параметры шероховатости (n), полученные из ф-лы 6, наблюдавшиеся расходы и параметры формы борозды сохранялись постоянными.

Исходные значения параметров инфильтрации f_0 , α и k (ф-ла 7) определялись, с использованием метода «две точки» (Elliott & Walker, 1982). Процедура расчета начиналась с определения основной скорости инфильтрации f_0 из гидрографа водоподачи-сброса для каждого изучаемого варианта полива, как описано у Walker & Skogerboe (1987).

Измерения влажности почвы проводились в каждой борозде орошаемого поля в трех створах: на расстоянии 0,25 L; 0,5 L и 0,75 L от головы борозды. Обсадные трубы нейтронного влагомера размещались в центре ложа борозды и на гребнях. Показания откалиброванного нейтронного влагомера (в трехкратной повторности) снимались через каждые 20 см, с глубин от 40 см до 120 см (или 140 см для замеров, снимаемых на гребнях). Почвенные образцы отбирались с поверхности и с глубины 20 см; замеры проводились до и через 3-5 дней после полива. Данные о содержании почвенной влаги использовались через упрощенный водный баланс для оценки требуемой поливной нормы (Z_{req}).

Эксплуатационные показатели

Эксплуатационные показатели, рассматриваемые в этом исследовании: эффективность использования поливной нормы E_a (%) и равномерность распределения увлажнения DU (%). DU характеризует систему орошения, и обычно точно согласуется с равномерностью развития посевов (рис. 3), и E_a – эксплуатационный показатель управления (Pereira & Trout, 1999; Pereira et al., 2002b). Они описываются следующими зависимостями:

$$E_a = \begin{cases} \frac{Z_{req}}{D} \times 100 & Z_{lq} > Z_{req} \\ \frac{Z_{lq}}{D} \times 100 & Z_{lq} < Z_{req} \end{cases} \quad [8]$$

$$DU = \frac{Z_{lq}}{Z_{avg}} \times 100 \quad [9]$$

где Z_{req} – средний слой (мм), требуемый для пополнения влагой корнеобитаемой зоны на той четверти поля, которая испытывает наибольший дефицит почвенной влаги; D – средний слой (мм), поданный на орошаемую площадь; Z_{lq} – средний слой (мм), впитавшийся на нижней четверти поля; Z_{avg} – средний слой воды, впитавшейся на всем поле (мм).



Рис. 3. Вид экспериментального поля в последней стадии вегетации, демонстрирующий равномерное развитие хлопчатника

Z_{req} оценивался из полевых измерений влажности почвы перед поливом, используемых для расчета дефицита почвенной влаги SMD (мм) в корнеобитаемой зоне. Измерения проводились на расстоянии 0,25 L; 0,5 L и 0,75 L от головы борозды. Предполагалось, что максимальный наблюдаемый SMD является наилучшей оценкой Z_{req} . Основываясь на фенологических оценках максимального развития основной массы корней хлопчатника, глубина корнеобитаемой зоны для всех поливов, принималась равной 0,7 м. Z_{avg} оценивался из расчетов слоя воды, впитавшейся в течение эффективного времени впитывания, относящегося к каждой точке i , через каждые 10 или 20 м для коротких и длинных борозд, соответственно. Как указывалось выше, для расчетных параметров инфильтрации использовалось уравнение Костякова в виде:

$$Z_i = k[(t_r)_i - (t_a)_i]^\alpha + f_0[(t_r)_i - (t_a)_i] \quad [10]$$

где k , α и f_0 – параметры инфильтрации, характеризующие каждый полив, а $(t_r)_i$ и $(t_a)_i$ – соответственно время добега и спада, относящиеся к точке i (мин). Z_{iq} оценивался из среднего, для той четверти борозды, где инфильтрация была наименьшей.

Средний слой водоподдачи D (мм) рассчитывался так:

$$D = \frac{q_{avf} \times 60 \times t_{co}}{L \times s} \quad [11]$$

где, q_{avf} – средний расход в борозду (л/с) в течение полива; t_{co} – продолжительность водоподачи (мин), и s – ширина междурядья (м).

Средний слой конечного сброса V_{out} (мм) вычислялся аналогично из:

$$V_{out} = \frac{q_{out} \times 60 \times t_{out}}{L \times s} \quad [12]$$

где q_{out} – средний расход сброса из борозды (л/с) в течение продолжительности сброса t_{out} (мин).

Результаты и обсуждение

Форма и уклоны борозд

Средний уклон по длине борозд составлял $S_{long} = 0,00212$ м/м, колеблясь от 0,00158 до 0,00275 м/м. Стандартное отклонение составляло $S_d = 0,00030$, а коэффициент вариации $CV=0,14$, т.е. вариации продольного уклона по длине борозд, в основном, небольшие (рис.4а).

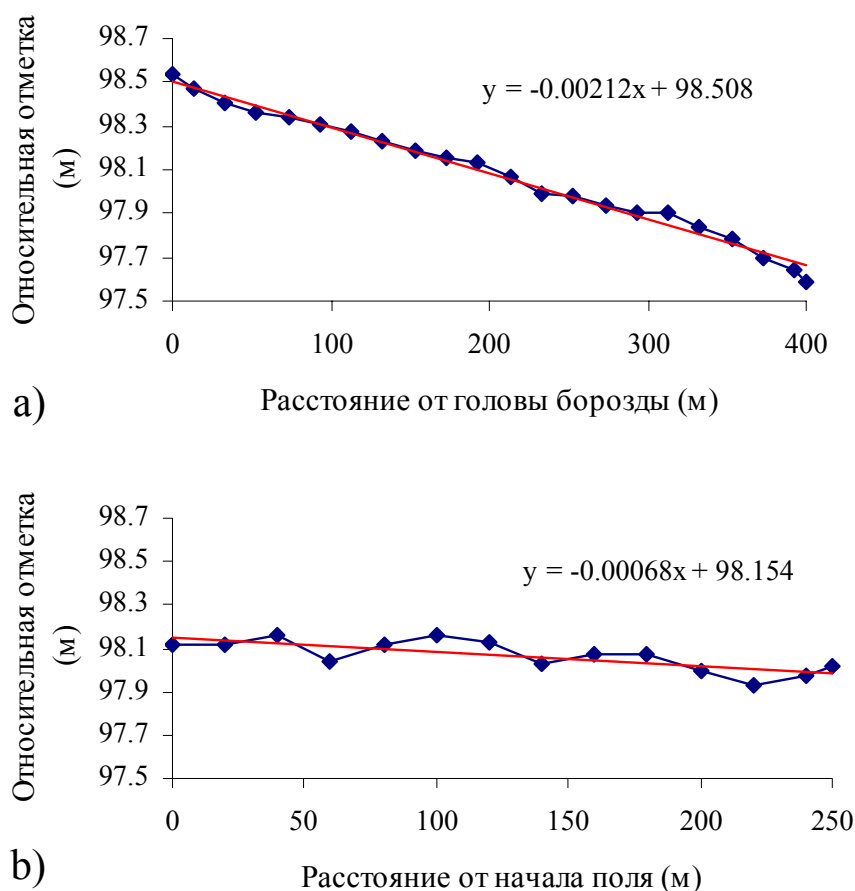


Рис.4. Типичные уклоны поля: (а) продольный и (б) поперечный

Средний поперечный уклон поля составлял $S_{\text{across}} = 0,00065$ м/м (рис. 4b) со стандартным отклонением $S_d = 0,00035$ м/м и коэффициентом вариации $CV = 0,55$. Диапазон вариации составлял от 0,00004 до 0,00089 м/м.

Влияние расхода на эрозию борозд на почвах Ферганской долины, в основном, очень значительно. Небольшой и средний расходы вариантов (1,2 и 1,8 л/с) были неэрозионными, но высокий расход (2,4 л/с) и, особенно, при первом поливе вызывал некоторую эрозию почв в начале борозд. Типичные поперечные сечения борозд до и после полива показаны на рис. 5. Результаты сравнения поперечного сечения до и после полива (рис. 5) показывают, что относительно высокая эрозия и осаждение наносов имеют место в пределах поля, что связано с тонкой текстурой почв и большими расходами, используемыми на длинных бороздах (таблица 1). Однако, вынос наносов за пределы поля был несущественным.

Расходы водоподачи в течение полива варьировали, с коэффициентом вариации в пределах от 0,06 до 0,28. Наибольшая вариация наблюдалась для вариантов А и В. Типичные гидрографы водоподачи-сброса представлены на рис. 6, где хорошо заметны колебания расходов, а также соответствующее влияние их на сброс.

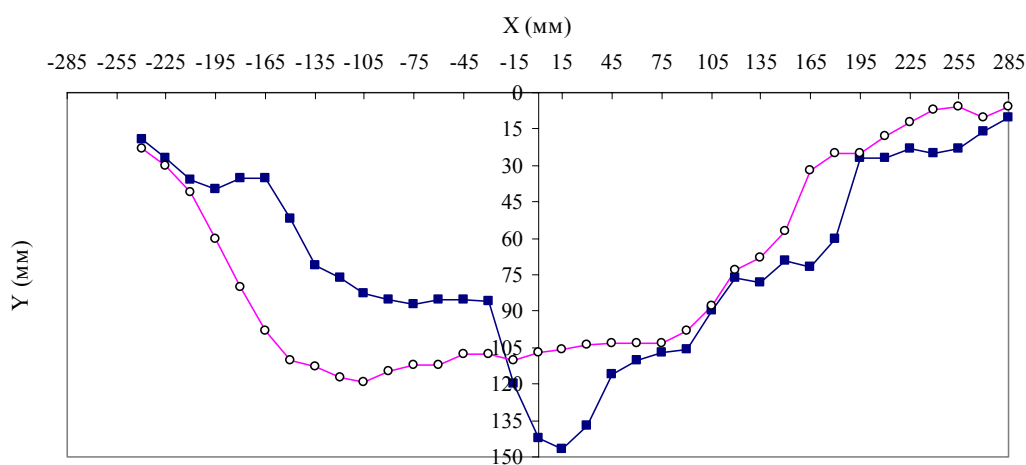


Рис. 5. Типичное поперечное сечение борозды до (■) и после (○) полива (борозда # 9, вариант С, первый вегетационный полив)

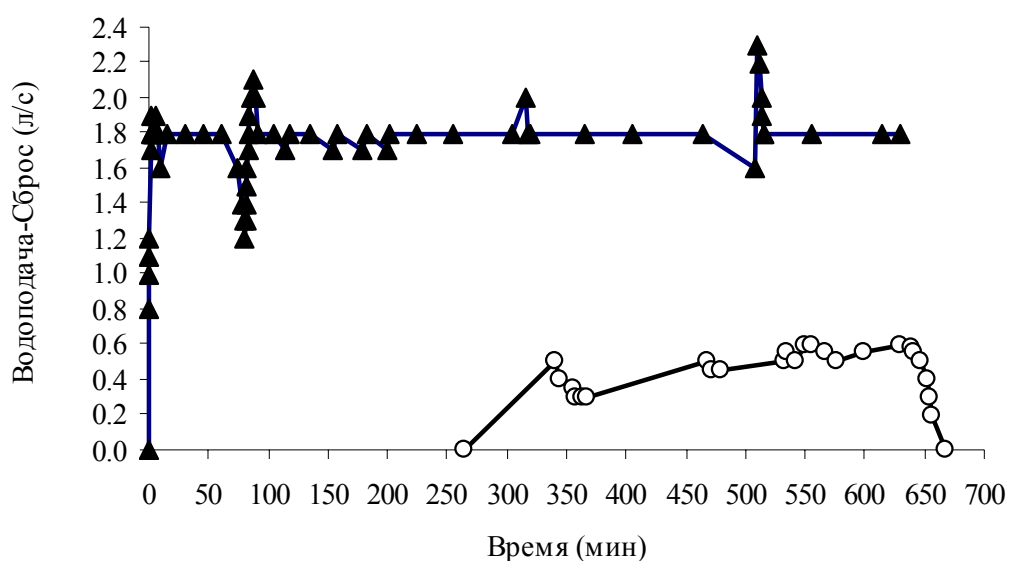


Рис. 6. Типичный гидрограф водоподачи-сброса (борозда 12, вариант D, третий вегетационный полив)

Типичные кривые добега и спада, измеренные и рассчитанные моделью SIRMOD, представлены на рис. 7. Они показывают, что кривые спада близки к линейным с незначительными отклонениями на начальных и конечных отрезках. Результаты также показывают, что, если применить параметры поиска, описанные в разделе Процедуры полевой оценки, модель SIRMOD адекватно описывает добег и спад.

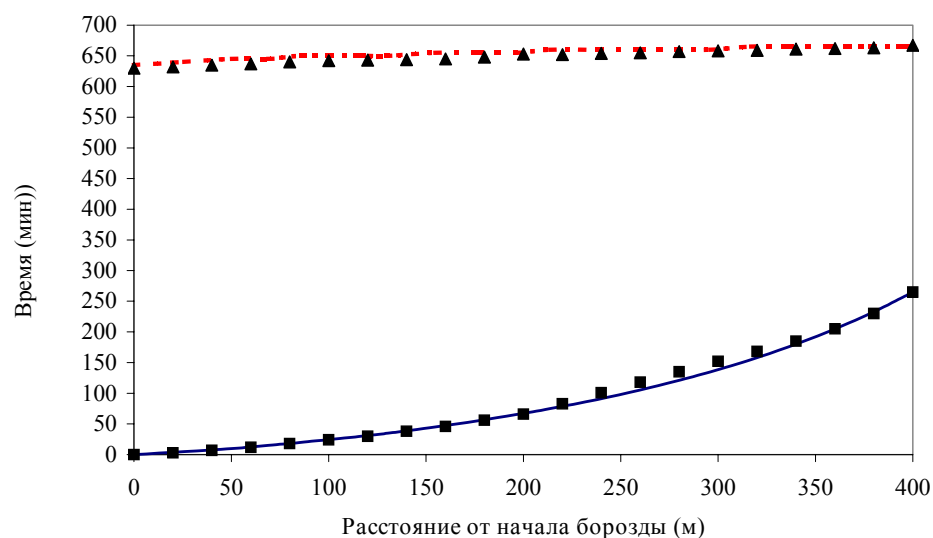


Рис. 7. Наблюдаемые кривые добега (■) и спада (▲) в сравнении с вычисленными кривыми добега (—) и спада (---) (борозда 12, вариант D, третий вегетационный полив)

Коэффициент шероховатости и инфильтрация

Коэффициент шероховатости n имел небольшую вариацию с первого до последнего полива, но понижался от первого к последнему поливу (таблица 3). Среднее значение составляло $n = 0,018 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$ и менялось от 0,020 до $0,017 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$ от первого к третьему поливу по длинным бороздам (400 м).

Таблица 3. Коэффициент шероховатости n по Маннингу, оцененный по данным полевых измерений

	Статистические показатели	$n \text{ (м}^{-1/3} \text{ с)}$
Все борозды и все поливы	Среднее	0,018
	Станд. отклонение	0,002
I полив, длинные борозды	Среднее	0,020
	Станд. отклонение	0,002
II полив, длинные борозды	Среднее	0,019
	Станд. отклонение	0,002
III полив, длинные борозды	Среднее	0,017
	Станд. отклонение	0,002

Оцененные основная скорость инфильтрации f_0 и параметры инфильтрации k и α представлены в таблице 4. Вариация всех параметров очень большая, когда одновременно оцениваются все варианты и все поливы. Эта изменчивость меньше для основной скорости инфильтрации f_0 на длинных бороздах. Вариация параметров k и α большая для всех поливов и снижается только при третьем поливе.

Среднее значение основной скорости инфильтрации f_0 для длинных борозд снижается от первого к третьему поливу с $0,000206$ до $0,000193 \text{ м}^3/\text{мин}/\text{м}$. Это может быть объяснено перераспределением почвенных частиц, обусловленным переносом и осаждением их внутри борозд, что в свою очередь, как указывалось, связано с изменениями поперечного сечения борозд (рис. 5), которое становится более стабильным только после второго полива. Параметры k и α не обладают явно выраженной тенденцией при сравнении соответствующих средних значений от первого к последнему поливу, но существовала тенденция для k к снижению после первого полива, и, наоборот, для α – к увеличению. Частично, вариации k и α можно объяснить различиями, относящимися к межполивной обработке борозд и степени уплотнения почвы колесами трактора (таблица 1).

Таблица 4. Оценка параметров инфильтрации и соответствующих статистических показателей их вариабельности

	Статистические показатели	f_0 ($m^3/min/m$)	k ($m^3/min^a/m$)	α
Все борозды и все поливы	Среднее	0,000224	0,0106	0,250
	Станд.отклонение	0,000116	0,0058	0,113
	CV	0,52	0,55	0,45
Длинные борозды (400 м)	Среднее	0,000192	0,0109	0,231
	Станд.отклонение	0,000042	0,0060	0,101
	CV	0,22	0,55	0,44
I полив, длинные борозды	Среднее	0,000206	0,0138	0,187
	Станд.отклонение	0,000050	0,0076	0,086
	CV	0,24	0,55	0,46
II полив, длинные борозды	Среднее	0,000206	0,0109	0,235
	Станд.отклонение	0,000035	0,0060	0,077
	CV	0,17	0,55	0,33
III полив, длинные борозды	Среднее	0,000193	0,0116	0,204
	Станд.отклонение	0,000027	0,0020	0,060
	CV	0,14	0,17	0,30

Соответственно вариабельности параметров инфильтрации в вариантах В, С и D, наблюдалась значительная разница в кривых инфильтрации, рассчитанных из полевых измерений добега и спада. Поэтому параметры инфильтрации, относящиеся к каждому из трех поливов, были сгруппированы для создания семейств кривых суммарной инфильтрации $Z = f(t)$, представляющих низкую, среднюю и высокую водопроницаемость почв (рис. 8). Позднее, параметры инфильтрации, относящиеся к этим семействам, использовались в модели SIRMOD для оценки эксплуатационных характеристик системы орошения и для проектирования улучшенных решений. Можно видеть (рис. 8), что для почв с низкой и средней интенсивностью инфильтрации большая разница между кривыми $Z = f(t)$ при первом поливе имеет тенденцию к уменьшению разницы при последующих поливах.

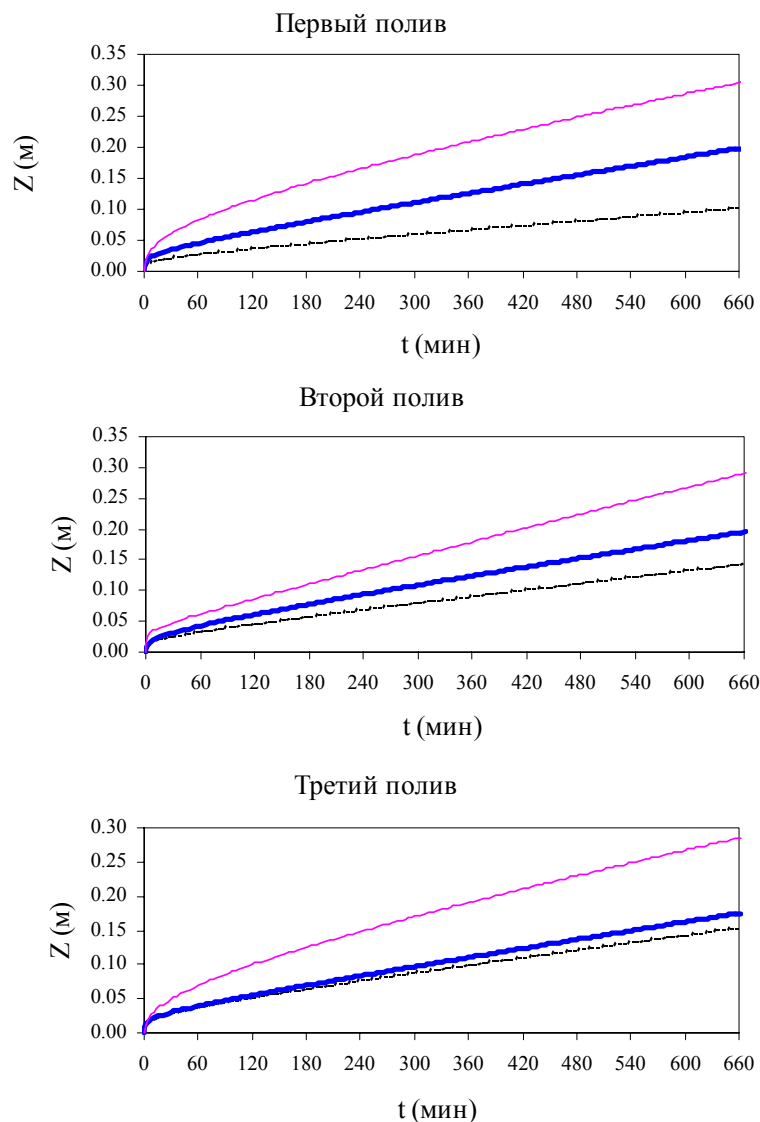


Рис. 8. Семейства кривых суммарной инфильтрации, относящиеся к высокой (---), средней (—) и низкой (—) водопроницаемости для трех поливов (варианты В, С и Д)

Влажность почвы

Средняя влажность почвы до и после полива и средний дефицит почвенной влаги (SMD) к моменту поливов приведены в таблице 5.

Доля истощения почвенной влаги колеблется от 0,43 до 0,56, что в основном, намного меньше, чем часто рекомендуемая для хлопчатника доля истощения почвенной влаги не допускающая стресса растений $p = 0,65$ (Allen et al., 1998). График поливов, не допускающий водного стресса растений, назначался самим фермером, это повлияло на результаты оценки, описанной ниже, так как срок проведения поливов назначался раньше оптимального. Другими словами, SMD к моменту полива был меньше, чем это необходимо из соображений экономии воды. Как следствие принятого графика поливов, наблюдаемый через 3 или 4 дня после полива слой воды,

добавленный в корнеобитаемую зону, был, в основном, небольшой. Эти обстоятельства указывают на большие возможности повышения эффективности использования поливной нормы, при увеличении межполивных периодов.

Таблица 5. Влажность почвы до и после полива и дефицит почвенной влаги (SMD) перед поливом

Номер полива	Вариант	Замеры до полива			Замеры после полива		
		Дата	Влажность почвы (% FC)*	SMD (мм)	Дата	Суток после полива	Влажность почвы (% FC)*
I	B	03.06	75,8	57,6	07.06	4	87,7
	C	01.06	69,0	73,9	05.06	3	93,2
	D	06.06	71,5	67,8	09.06	3	88,7
II	B	25.06	72,9	64,5	30.06	4	101,1
	C	24.06	75,9	57,5	29.06	4	91,9
	D	27.06	76,4	56,2	01.07	3	98,1
III	B	11.07	71,6	67,6	17.07	4	102,4

* FC: влажность почвы при полевой влагоемкости

Характеристики полива

Для анализа исследуемых характеристик полива использовались результаты первого и третьего поливов хлопчатника. Результаты первого полива приведены в таблице 6.

Таблица 6. Характеристики первого вегетационного полива

Вариант	Длинные борозды (L = 400 м)						Ярусный (3 x L = 130 м)			
	Расчетный расход водоподачи						Средний расход			
	2,4 л/с		1,8 л/с				1,2 л/с	1,8 л/с	1,29 л/с	0,96 л/с
	B	C	B	C	D		B	A		
Номер борозды	5	9	6	10	11	12	7	1	2	3
q _{in} (л/с/борозда)	2,35	2,34	1,74	1,78	1,79	1,79	1,17	2,30*)	1,75	1,17
t _{co} (мин)	360	540	565	540	505	505	500	145	178	210
t _{av} (мин)	152	224	476	284	233	452	256	30	54	65
q _{out} (л/с)	0,90	0,56	0,16	0,27	0,15	0,06	0,33	0,95	0,99	0,44
t _{out} (мин)	266	351	169	292	313	101	304	144	162	170
D (мм)	141	105	164	80	151	151	97	134	118	104
Z _{avg} (мм)	108	91	163	77	142	148	82	80	79	91
Z _{req} (мм)	73,5	74,2	73,5	74,2	73,9	73,9	73,5	73,5	73,5	73,5
Z _{lq} (мм)	98,6	80,4	117,0	64,6	122,0	96,8	70,2	79,8	77,9	85,0
E _a (%)	52,2	70,6	44,8	80,8	48,9	49,0	72,1	55,0	62,4	70,9
DU (%)	91,4	88	71,9	83,6	85,8	65,3	85,8	99,3	98,8	93,9

*) Расходы в течение фазы добегания и доувлажнения

Первый полив проводился, когда SMD нижней четверти поля изменялся от 73,5 мм (вариант А) до 74,2 мм (вариант С). Результаты из таблицы 6 показывают, что DU в большинстве случаев высокий, только у борозд 6 и 12 $DU < 83\%$, что связано с условиями уклонов и инфильтрации, из-за которых затянулась длительность добегаания. Поливная норма D , в основном, намного выше требуемой Z_{req} . Это связано с большой длительностью добегаания t_{adv} на бороздах 6 и 12 (рис. 7) и избыточной длительностью полива t_{co} . Фактически, во избежание водного стресса растений фермеры используют большую длительность полива, что приводит к переполиву. В некоторых случаях, несмотря на избыточный D , слой впитавшейся воды в нижней четверти меньше заданной Z_{req} . Это объясняется неравными слоями инфильтрации (рис. 9), несмотря на то, что DU сохраняет высокое значение.

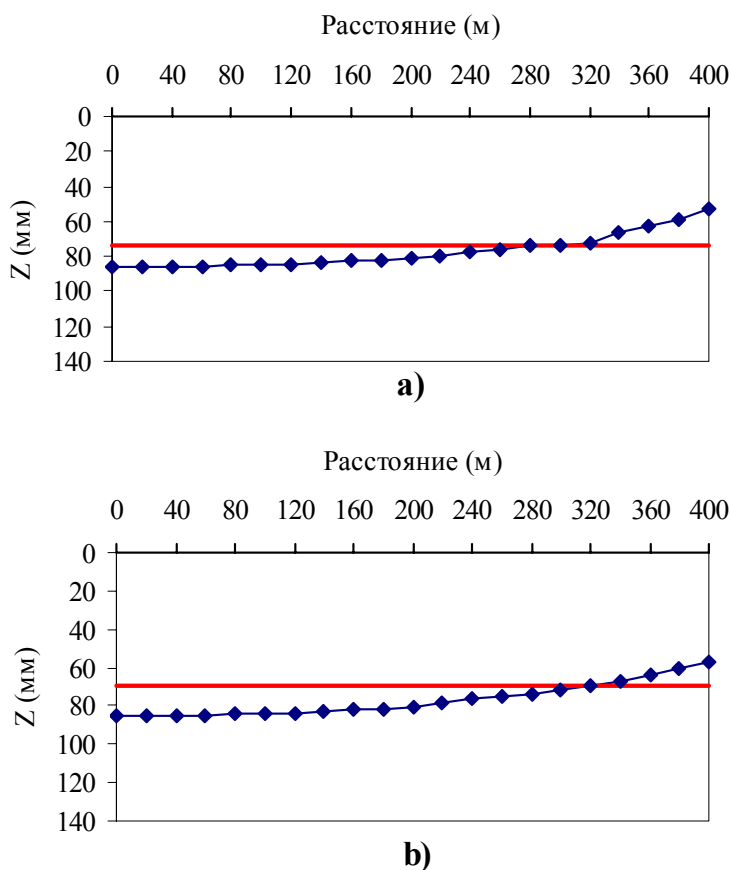


Рис. 9. Профили инфильтрации борозды 10, вариант С:
а) первый полив и б) третий полив

В большинстве случаев конечной поверхностный сброс не очень высокий, особенно при поливе через междурядье, но продолжительность сброса (t_{out}) зачастую довольно велика, что также связано с наблюдаемым избыточным t_{co} . Эффективность использования поливной нормы в боль-

шинстве случаев низкая, часто $E_a < 50\%$, как из-за переполива, так и из-за небольшого SMD к моменту начала полива. Большая часть поданной воды просачивается затем ниже корнеобитаемой зоны, так как не может быть удержана там.

При сравнении результатов, относящихся к используемым расходам водоподачи в борозды, можно заключить, что в большинстве случаев, включая короткие борозды, используемые при многоярусном поливе, высокие расходы нецелесообразны. Относительно наблюдений на длинных бороздах при $q_{in} = 2,4$ л/с наилучшие E_a и DU были получены для варианта С при водоподаче через междурядье ($E_a=70,6$ % и $DU = 88$ %). При $q_{in} = 1,8$ л/с лучшие E_a и DU также были получены для того же варианта С с $E_a = 80,8$ % и $DU = 83,6$ % (рис. 7). Это указывает на то, что это наилучший расход для полива через междурядье. Также на длинных бороздах, но при водоподаче в каждое междурядье, лучшая комбинация E_a и DU соответствует варианту В с $q_{in} = 1,2$ л/с ($E_a = 72,1$ % и $DU = 85,8$ %).

Что касается многоярусного полива, хорошие результаты были достигнуты при расчетном расходе $q_{in} = 1$ л/с (борозда 3), что обеспечило $E_a = 70,9$ % и $DU = 93,9$ %.

При проведении третьего полива, SMD колебался в пределах 69,0 мм в варианте С и 78,9 мм в варианте В (рис. 10). Соответствующие результаты оценки представлены в таблице 7.

Таблица 7. Характеристики третьего вегетационного полива

Вариант	Длинные борозды (L = 400 м)						Ярусный (3 x L = 130 м)			
	Расчетный расход водоподачи						Средний расход			
	2,4 л/с		1,8 л/с		1,2 л/с		2,07 л/с	1,21 л/с	0,87 л/с	
Номер борозды	В	С	В	С	Д	В	А	А	А	А
q_{in} (л/с/борозда)	2,39	2,36	1,79	1,78	1,79	1,78	1,21	2,36*)	1,79	1,19
t_{co} (мин)	540	540	660	540	630	630	720	275	275	309
t_{av} (мин)	143	118	297	251	230	265	457	27	41	56
q_{out} (л/с)	0,97	0,95	0,33	0,22	0,27	0,42	0,20	1,19	1,29	0,73
t_{out} (мин)	457	459	412	335	439	402	315	297	273	288
D (мм)	215	106	197	80	188	187	145	332	250	189
Z_{avg} (мм)	141	76	177	77	173	167	143	172	88	103
Z_{req} (мм)	78,9	69,0	78,9	69,0	75,1	75,1	78,9	71,3	69,3	71,3
Z_{1q} (мм)	132,2	72,0	151,3	65,0	153,4	144,4	113,0	169,8	86,8	100,7
E_a (%)	36,7	65,0	40,1	80,8	39,9	40,1	54,5	21,5	28,6	37,8
DU (%)	93,5	94,5	85,5	84,5	88,5	86,6	78,9	98,9	98,9	97,5

*) Расходы в течение фазы добегания и доувлажнения

Результаты в таблице 7 показывают, что относительно первого полива DU, в основном, повышается и только в одном случае $DU < 85$ %. Повышение DU было, главным образом, обусловлено тем фактом, что поверхность

ложе борозд была сглажена предшествующими поливами, в связи с чем уменьшенная продолжительность добегания позитивно повлияла на DU.



Рис. 10. Вид опытного поля хлопчатника при третьем поливе (вариант В)

Поливные нормы D были много выше требуемых, потому что длительность полива t_{co} была, в основном, больше, чем при первом поливе, в то же время Z_{req} был небольшой. Это объясняется, также как и для первого полива, тем фактом, что общепринятая практика фермеров направлена на предупреждение водного стресса растений, поэтому они предпочитают переполнив в качестве лучшего контроля риска, связанного с возможной нехваткой воды. Это обыкновение приводит к тому, что слой, профильтровавшийся на нижней четверти, в основном, намного больше, чем планируемый Z_{req} . В результате весьма низка эффективность использования поливной нормы, часто $E_a < 40\%$. Концевой сброс был выше, а в некоторых случаях намного выше, чем при первом поливе, увеличиваясь при использовании высоких расходов. При поливе через междурядье сброс был меньше, чем при других способах водоподачи.

При сравнении результатов, относящихся к различным расходам водоподачи в борозды, было подтверждено, что высокие расходы не подходят для коротких борозд и E_a низкий на всех многоярусных вариантах. В сравнении с первым поливом, результаты были ухудшены применением избыточных поливных норм D . На длинных бороздах с $q_{in} = 2,4$ л/с лучшие E_a и DU опять были получены для варианта С при поливе через междурядье ($E_a = 65,0\%$ и $DU = 94,5\%$). При применении меньшего расхода $q_{in} = 1,8$ л/с лучшие E_a и DU ($E_a = 80,8\%$ и $DU = 84,5\%$) также были получены при водоподаче через междурядье (вариант С). Этот расход водоподачи в борозду, по всей видимости, наиболее подходит для полива через междурядье. Для

расхода $q_{in} = 1,2$ л/с лучшая комбинация E_a и DU ($E_a = 54,5\%$ и $DU = 78,9\%$) соответствовала варианту В с длинными бороздами и поливом каждого междурядья; этот расход наиболее соответствовал поливу каждого междурядья, но эксплуатационные характеристики хуже, чем полученные при поливе с $q_{in} = 1,8$ л/с через междурядье.

Обсуждение улучшений характеристик полива

Равномерность распределения увлажнения DU и эффективность использования поливной нормы зависят от большого числа факторов, таких как единичный расход, гидравлическая шероховатость, характеристики инфильтрации в почву, параметры поперечного сечения борозды, длительность полива и продольный уклон борозд (Pereira, 1999). Кроме того, E_a зависит от дефицита почвенной влаги к моменту полива. Вместе с тем, следует обратить внимание на условия спланированности земель, так как они играют важную роль для достижения равномерного потока поливных струй вдоль поля, особенно при поливе по чекам (Playan et al., 1996; Fangmeier et al., 1999; Pereira et al., 2002 b). В этом исследовании, поскольку его целью являлась полевая оценка потенциального водосбережения при применении легкодоступных технологий, относящихся к поливу по бороздам, а равномерность распределения увлажнения была относительно хорошей, точность планировки земель во внимание не принималась. В связи с этим, факторы, посредством которых фермер может управлять системой орошения, с тем, чтобы повысить равномерность распределения увлажнения DU и эффективность использования поливной нормы E_a , могут быть описаны упрощенными функциональными зависимостями (Pereira and Trout, 1999), такими как:

$$DU = f(q_{in}, t_{co}) \quad [13]$$

и

$$E_a = f(q_{in}, t_{co}, SMD) \quad [14]$$

где принятые обозначения были предварительно определены ранее.

Относительно расходов в борозду, результаты, проанализированные выше, показывают, что целесообразно применение $q_{in} = 1,8$ л/с при поливе через междурядье и $q_{in} = 1,2$ л/с при поливе каждого междурядья. В случае многоярусного полива по коротким бороздам, лучшая комбинация E_a и DU относится к $q_{in} = 1,2$ л/с в течение добега и $q_{in} = 0,75$ л/с в течение фазы доувлажнения после завершения добега. Тем не менее, эти результаты могут потребовать дальнейшего подтверждения в полевых условиях. Результаты также показывают, что другими основными факторами, ведущими к улучшению характеристик, являются, во-первых, снижение длительности полива t_{co} и, во-вторых, оттягивание сроков поливов до более высоких значений SMD к моменту полива. Последнее зависит от принятия улучшенно-

го графика поливов (Fortes et al., 2005). Упорядочение t_{co} наряду с улучшенными бороздными расходами может относительно легко применяться фермерами в качестве более совершенной практики управления орошением.

С целью подтверждения этих гипотез было выполнено моделирование третьего полива (таблица 7), с уменьшением t_{co} , но с сохранением всех других переменных и констант. Результаты моделирования, приведенные в таблице 8, показывают, что принятие меньшей длительности полива, в большинстве случаев ведет к лучшей подгонке средних слоев инфильтрации к требуемым и снижению объемов водоподачи D. Тем не менее результаты отличаются по вариантам, становясь более эффективными для многоярусного полива и на длинных бороздах для случаев полива каждого междурядья.

Таблица 8. Улучшенные характеристики третьего вегетационного полива

Вариант	Длинные борозды (L = 400 м)						Ярусный (3 x L = 130 м)			
	Расчетный расход водоподачи						Средний расход			
	2,4 л/с		1,8 л/с		D		1,2 л/с	2,07 л/с	1,21 л/с	0,87 л/с
Номер борозды	B	C**)	B	C**)	D	B	A	1	2	3
q_{in} (л/с/борозда)	2,39	2,36	1,79	1,78	1,79	1,78	1,21	2,36*) 1,94	1,79	1,19
t_{co} (мин)	310	540	410	540	384	420	673	85	170	192
t_{av} (мин)	143	118	297	251	230	265	457	27	41	56
q_{out} (л/с)	0,74	0,95	0,23	0,22	0,16	0,28	0,18	0,63	1,15	0,66
t_{out} (мин)	209	459	162	335	193	193	268	107	168	171
D (мм)	123	106	121	80	115	125	136	90	105	86
Z_{avg} (мм)	93	76	116	77	111	116	133	73	69	74
Z_{req} (мм)	78,9	69,0	78,9	69,0	75,1	75,1	78,9	71,3	69,3	71,3
Z_{lq} (мм)	83,0	72,0	90,0	65,0	89,8	90,7	103,0	71,1	68,1	71,4
E_a (%)	64,1	65,0	65,0	80,8	65,3	60,2	58,2	78,7	64,8	82,9
DU (%)	89,7	94,5	77,4	84,5	81,1	78,3	77,3	97,1	98,4	96,2

*) Расходы в течение фазы добегаания и доувлажнения

**) Борозды без моделирования улучшений

Для варианта С – полив через междурядье – реакция на изменение t_{co} будет влиять на снижение слоя инфильтрации ниже требуемого, поэтому эти изменения не рассматриваются в таблице 8. Объясняется это тем фактом, что удержание почвенной влаги в корнеобитаемом слое в случае полива через междурядье много больше, чем в случае полива каждого междурядья (рис. 11).

При сравнении результатов варианта С с результатами вариантов В и D (таблица 7) можно отметить, что поливные нормы в случае С были уже почти в два раза меньше норм при поливе каждого междурядья. Аналогичное, но менее резкое снижение D также наблюдалось для первого (и второ-

го) поливов (таблица 6). Поэтому экономия воды, обусловленная применением полива через междурядье вместо полива каждого междурядья, составляет 200 мм при $q_{in} = 1,8$ л/с/борозда и 300 мм при $q_{in} = 2,4$ л/с/борозда. Тем не менее, следует рассмотреть дальнейшие усовершенствования, ведущие к снижению длительности добега и более равномерной инфильтрации, такие как, например, дискретное регулирование водоподачи в борозды (Хорст и др., 2005).



Рис. 11. Полив хлопчатника через междурядье (второй полив, вариант С)

При многоярусном поливе t_{co} может быть снижено на треть от фактического при среднем q_{in} около 2 л/с/борозда и на две трети при меньшем расходе, близком к 0,9 л/с/борозда. Далее, слои водоподачи снижаются с 332 до 90 мм или от 189 до 86 мм, соответственно. Экономия воды на третьем поливе могла колебаться между 103 и 242 мм. При этом способе при соответствующем управлении 3 ярусами борозд потенциальная экономия воды на трех вегетационных поливах хлопчатника может превысить 300 мм. Результаты также показывают, что хорошие эксплуатационные характеристики полива могут быть достигнуты при различных расходах водоподачи, но лучше реагируют на расходы, идентифицированные в полевых опытах, $q_{in} = 1,2$ л/с в течение добега и $q_{in} = 0,75$ л/с при завершении фазы добега. Однако, многоярусный полив труден для внедрения на практике среди фермеров, поскольку требует дополнительных затрат труда при нарезке распределительного «шох-арыка» (рис. 1) и требует относительно сложного управления водой на поле.

На длинных бороздах, где не применялся способ полива через междурядье, снижение t_{co} на одну треть ведет к большой экономии воды почти на 90 мм при $q_{in} = 1,8$ л/с/борозда и около 70 мм при $q_{in} = 2,4$ л/с/борозда. Аналогичная, но меньшая экономия воды была достигнута при первом и втором поливах, таким образом, назначение более подходящей длительности полива, обеспечит потенциальную экономию воды за вегетацию от 150 до 200 мм. Дальнейшая экономия воды вероятна при применении дискретного полива (Павлов и Хорст, 1995; Хорст и др., 2005).

Выводы

Системы полива по бороздам в Ферганской долине характеризовались относительно уклонов и геометрии борозд, расходов, гидравлической шероховатости, инфильтрационных характеристик и продолжительности добега и спада. Полевые оценки, произведенные на поле, управляемом фермером, показали, что равномерность распределения увлажнения, как правило, высокая, что указывает на хорошие характеристики системы орошения, в тоже время эффективность использования поливной нормы низка, что указывает на плохое управление системой. Фермер прежде всего заинтересован в высоком DU, поскольку это приводит в результате к более равномерному фону для получения урожая. Причинами низкого E_a зачастую являются очень большая длительность добега, не совсем удачный выбор срока проведения полива и избыточная поливная норма, обусловленная большой длительностью полива. Как длительность полива, так и срок проведения полива отражают предпочтение фермера к переполиву, с тем, чтобы избежать водного стресса растений. Поэтому важным для внедрения исследовательских находок является сотрудничество с фермерами, т.к. они сильно привязаны к традиционной практике орошения.

Лучшие характеристики на длинных бороздах наблюдались на поливе через междурядье, при котором потенциальная экономия воды за вегетацию по сравнению с поливом каждого междурядья около 200 мм для $q_{in} = 1,8$ л/с/борозда и 300 мм для $q_{in} = 2,4$ л/с/борозда. Учитывая боковое перераспределение впитавшейся воды при поливе через междурядье, этот способ, может быть рекомендован в качестве водосберегающего приема для широкого распространения на относительно выровненных суглинистых почвах центральной части Ферганской долины.

При поливе каждого междурядья практикой, предлагаемой для длинных борозд, является снижение длительности полива. Для исследованных условий, снижение t_{co} на одну треть ведет к потенциальной экономии воды за вегетацию от 150 до 200 мм.

Многоярусный полив, где задействованы три яруса борозд длиной по 130 м для повторного использования поверхностного сброса с верхних ярусов, показывает хорошие характеристики при удачно подобранных расходах и, главным образом, длительности полива. Потенциальная экономия воды за вегетацию при этом способе превышает 300 мм. Вместе с тем, этот

метод полива требует дополнительных затрат труда и тщательной регулировки и многократной перерегулировки расходов.

В дальнейших исследованиях следует оценить эффективность и продуктивность орошения при дискретном поливе, использующем неавтоматизированное и недорогое оборудование для дискретного регулирования поливных струй на длинных бороздах, включая полив через борозду. Этот способ регулирования водоподачи имеет потенциальную возможность снижения длительности добега, создания условий для более равномерной инфильтрации и снижения конечного поверхностного сброса. Применение более соответствующих сроков полива требует, как отмечается Чолпанкуловым и его соавторами (2005), совершенствования подходов к составлению режима орошения.

Выражение признательности

Выражаем благодарность Ш. Хамдамову, Л. Соколовой и Т. Ахмедову за помощь в проведении полевых работ, В. Дашиной за компьютерную обработку данных. Признательны за поддержку со стороны NATO Science Fellowships Program (COUZ21C2001PO).

Библиография

- Джурабеков, И.Х. и Лактаев, Н.Т. 1983. Совершенствование оросительных систем и мелиорация земель Узбекистана, Ташкент, «Узбекистан», 152 стр.
- Духовный, В.А. и Умаров, П.Д. 1999. Водосбережение, как ключевой фактор устойчивого развития в бассейне Аральского моря. Ж. «Мелиорация и водное хозяйство». (Москва) 4: стр. 9-12.
- Лактаев, Н.Т. 1978. Полив хлопчатника. Изд. «Колос», Москва, 176 стр.
- Павлов, Г.Н. и Хорст, М.Г. 1995. Об одном методе расчета характеристик дискретного (импульсного) полива по бороздам. В: Духовный, В.А. (Ред.) Мелиорация и водное хозяйство, Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации им.В.Д.Журина (САНИИРИ), Ташкент, стр. 73-86.
- Хорст, М.Г., 1989. Совершенствование технологических схем полива по бороздам в целях снижения затрат оросительной воды. В: Духовный, В.А. (Ред.) Совершенствование водосберегающей технологии и прогрессивной техники полива на орошаемых землях Средней Азии, САНИИРИ, Ташкент, стр. 92-100.
- Хорст, М.Г., Шамуталов, Ш.Ш., Гонсалвес, Д.М., Перейра, Л.С., 2005. Дискретный полив в качестве приема водосбережения (в этом сборнике).

- Чолпанкулов, Э.Д., Инченкова, О.П., Перейра, Л.С., Паредес П., 2005. Стратегии орошения для решения проблемы дефицита воды (в этом сборнике).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper 56, FAO, Rome, 300p.
- Calejo, M.J., Sousa, P.L., Pereira, L.S., 1998. Evaluation of performance of surface irrigation systems: optimisation of infiltration and roughness parameters. In: Pereira, L.S., Gowing, J.W. (Eds.) Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage (1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon), E& FN Spon, London, pp. 140-148.
- Clemmens, A.J., Wahl, T.L., Bos, M.G., Replogle, J.A., 2001. Water Measurement with Flumes and Weirs. ILRI Publ. 58, ILRI, Wageningen.
- Elliott, R.L., Walker, W.R., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Trans. ASAE, 25(2): 396-400.
- Fangmeier, D.D., Clemmens, A.J., El-Ansary, M., Strelkoff, T.S., Osman, H.E., 1999. Influence of land leveling precision on level-basin advance and performance. Trans. ASAE 42 (4): 1019-1025.
- 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.
- Horst, M.G., Shamutalov, Sh.Sh., Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., 2005. Surge-flow irrigation for water saving (this issue).
- ISED, 1989. SIRMOD, Surface Irrigation Simulation Software. User's Guide. Irrigation Software Engng. Div., Dep. Agric. Irrig. Engng., Utah St. Univ., Logan.
- Katopodes, N.D., Tang, J.H., Clemmens, A.J., 1990. Estimation of surface irrigation parameters. J. Irrig. Drain. Engng. 116 (5), pp. 676-696.
- Li, Y.N., Calejo, M.J., 1998. Surface irrigation. In: Pereira, L.S., Liang, R.J., Musy, A., Hann, M.J. (Eds.) Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the North China Plain. DER, ISA, Lisboa, pp. 236-303.
- Merriam, J.L., Keller, J., 1978. Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management. Utah St. Univ. Logan.
- Pereira, L.S., Trout, T.J., 1999. Irrigation Methods. In: van Lier, H.N., Pereira, L.S., Steiner, F.R. (Eds.) CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI: 297-379.
- Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I., 2002a. Coping with Water Scarcity. UNESCO IHP VI, Technical Documents in Hydrology No. 58, UNESCO, Paris, 267 p.
- Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A., 2002b. Irrigation management under water scarcity, Agric. Water Manage., 57: 175-206.
- Playan, E., Faci, J.M., Serreta, A., 1996. Modeling microtopography in basin irrigation. J. Irrig. Drain. Engng. 122(6): 339-347.
- Replogle, J.A., Bos, M.G., 1982. Flow measurement flumes: application to irrigation water management. Advances in Irrigation, Academic Press, New York, vol. 1:147-217.

Walker, W.R., 1989. Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 45, FAO, Rome.

Walker, W.R., Skogerboe, G., 1987. Surface Irrigation: Theory and Practice. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Глава 14.

ДИСКРЕТНЫЙ ПОЛИВ В КАЧЕСТВЕ ПРИЕМА ВОДОСБЕРЕЖЕНИЯ

М.Г. Хорст²³, Ш.Ш. Шамуталов²³, Д.М. Гонсалвес²⁴, Л.С. Перейра²⁴

Реферат: С целью совершенствования приемов водосбережения и рационального использования воды в орошаемом земледелии выполнялась серия полевых экспериментов с различными вариантами орошения по бороздам полей хлопчатника и оценивалась возможность совершенствования характеристик бороздкового полива в условиях центральной части Ферганской долины Узбекистана. Исследования заключались в сравнении дискретной и непрерывной водоподачи в длинные борозды при водоподаче в каждое междурядье и с чередованием поливаемых и сухих междурядий. Наилучшие результаты были получены для варианта дискретного полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий. На основе полевых экспериментов была выполнена калибровка модели поверхностного полива, которая затем использовалась для идентификации альтернативных приемов управления поливом. Результаты показали необходимость лучшего подбора расходов водоподачи применительно к условиям инфильтрации, длительности полива к дефициту влажности почвы и совершенствования графика поливов. Наилучшая продуктивность использования оросительной воды ($0,61 \text{ кг/м}^3$) была достигнута на варианте «дискретный полив с чередованием поливаемых и сухих междурядий», при котором затраты оросительной воды снизились на 44 % (390 мм), а эффективность использования оросительной воды на уровне поля составила 85 %. Результаты продемонстрировали возможность применения в этом регионе «дефицитного» орошения.

²³ Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), дом 11, Карасу-4, Ташкент, 700187, Узбекистан, horst_san@mail.ru

²⁴ Center for Agricultural Engineering Research, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, Fax: +351 21 362 1575; lspereira@isa.utl.pt

Ключевые слова: продуктивность использования оросительной воды, эффективность использования оросительной воды, равномерность увлажнения, полив через борозду, дефицитное орошение.

Введение

Первый этап наших исследований бороздкового полива хлопчатника показал, что снижение объемов водоподачи путем регулирования длительности водоподачи и применения полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий может привести к значительной экономии воды по сравнению с традиционным поливом в каждую борозду (Хорст и др., 2005). Эти же исследования выявили необходимость более обоснованного назначения срока полива, в связи с тем, что обычно практикуемый фермерами полив при небольшом дефиците почвенной влаги к моменту начала полива приводит к большим потерям на поверхностный сброс и фильтрацию. В качестве альтернативного приема повышения эффективности орошения была выявлена необходимость в оценке потенциального водосбережения при применении дискретного полива.

Технология дискретного полива впервые была разработана и применена в Болгарии (Varlev, 1971; Varlev *et al.*, 1998) и в бывшем СССР, а именно в Киргизии и Узбекистане (Пензин и Терпигорев, 1977; Хамраев и Юсупов, 1980; Терпигорев, 1983; Павлов и Хорст, 1995). Однако, недостаток действенного интереса водопользователей к этой передовой технологии не позволил широко применить ее на практике. Таким образом, несмотря на то, что в США она была разработана позже (Stringham and Keller, 1979), эта технология стала известной в мире после широкого применения с 80-х гг. в США (Walker and Skogerboe, 1987; Humpherys, 1989). Дискретный полив может снизить затраты труда (автоматизированный полив двух групп борозд одним переключателем потока), повысить равномерность увлажнения (более быстрый добег), и уменьшить поверхностный сброс (доувлажнение уменьшенным расходом после добегания).

Исследования, проведенные в Узбекистане (Хорст и др., 1990), определили площадь около 1 миллиона га или 24 % от всей орошаемой площади Республики, как потенциально пригодную для внедрения технологии дискретного полива. Основанное на предыдущих исследованиях, данное исследование имело своей целью оценку потенциального водосбережения при поливе хлопчатника по бороздам при использовании дискретного регулирования поливных струй и полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий.

Материалы и методы

Варианты

Полевые исследования дискретного полива проводились в течение вегетационного периода 2002 г. на хлопковом поле в хозяйстве «Азизбек-1», расположенном в центральной части Ферганской долины. Анализировались три варианта полива (таблица 1).

Таблица 1. Варианты дискретного и непрерывного полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий

Варианты полива	Номер борозды	Длина (м)	Уклон (м/м)	Расход (л/с)	Уплотнение почвы
Fa - Дискретный	17	320	0,0028	2,4/1,2	Уплотненная
	18	320	0,0028	2,4/1,2	Уплотненная
Fb- Дискретный	21	320	0,0028	3,0/1,5	Уплотненная
	22	320	0,0028	3,0/1,5	Уплотненная
G- Непрерывный	19	320	0,0028	2,4	Уплотненная
	20	320	0,0028	2,4	Уплотненная

* Ширина междурядья составляла 0,9 м.

Сроки полива и длительность водоподачи на контрольном варианте G назначались фермером. Водоподача осуществлялась, когда оросительная вода была доступной на данном поле, отражая таким образом фактические условия водооборота между несколькими фермами.

Из-за отсутствия поливных трубопроводов для распределения воды по бороздам дискретный полив был неавтоматизированным, но адаптированным к существующим условиям, когда вода подается к поливным бороздам через распределительную борозду, которая снабжается водой из полевого канала-оросителя в земляном русле (рис. 1).

Для того, чтобы дискретно регулировать водоподачу, вода, подаваемая из оросителя, попеременно направлялась в левую или правую сторону распределительной борозды при помощи вручную регулируемой дисковой задвижки. Процедура относительно трудоемкая, но аналогична нынешней практике полива непрерывной струей. Отсутствие достаточных средств для инвестирования в автоматизацию ведет в настоящее время к разработке такой упрощенной техники.

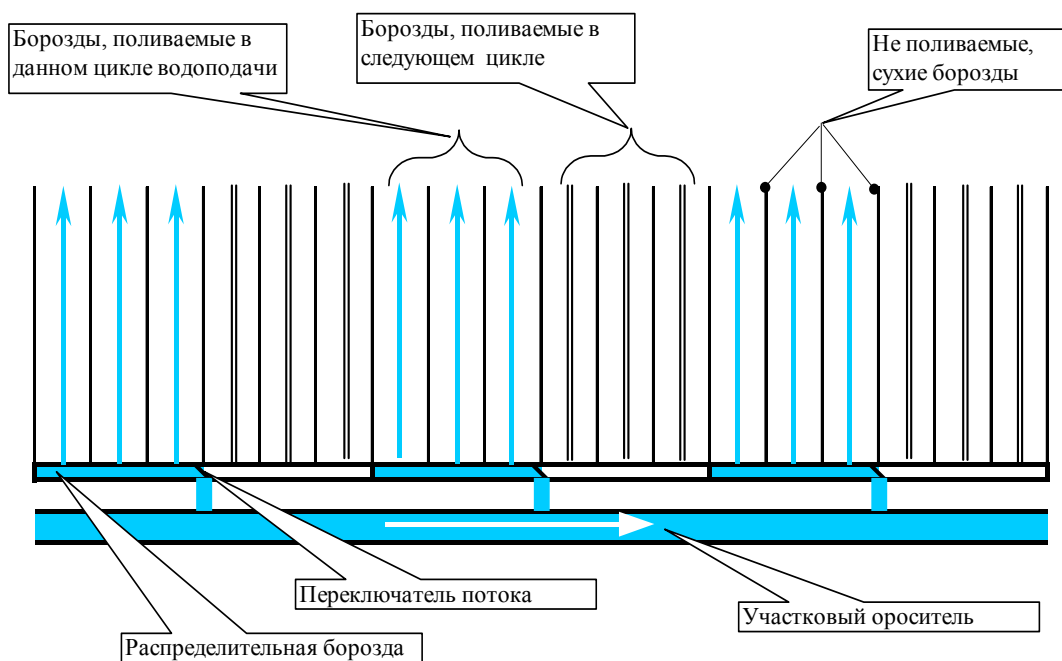


Рис. 1. Схема дискретной вододачи при поливе через борозду

Дискретный полив управлялся по правилу одной четверти. Первый импульс начинался с подачи воды в правое плечо и заканчивался при достижении лбом поливной струи четверти длины поля. Затем вода подавалась в левое плечо до момента достижения четверти длины, а затем последовательно в правое и левое плечи до завершения полного добега поливных струй до конца поля (рис. 2). Когда добег завершался в бороздах левого плеча, задвижка устанавливалась таким образом, чтобы борозды правого плеча получали половину начального расхода и, после периода времени, равного длительности четвертого импульса, расход увеличивался вдвое и делился на обе стороны, которые поливались одновременно. По окончании полива борозд правого плеча расход снижался и только борозды левого плеча поливались до завершения полива (рис. 2).

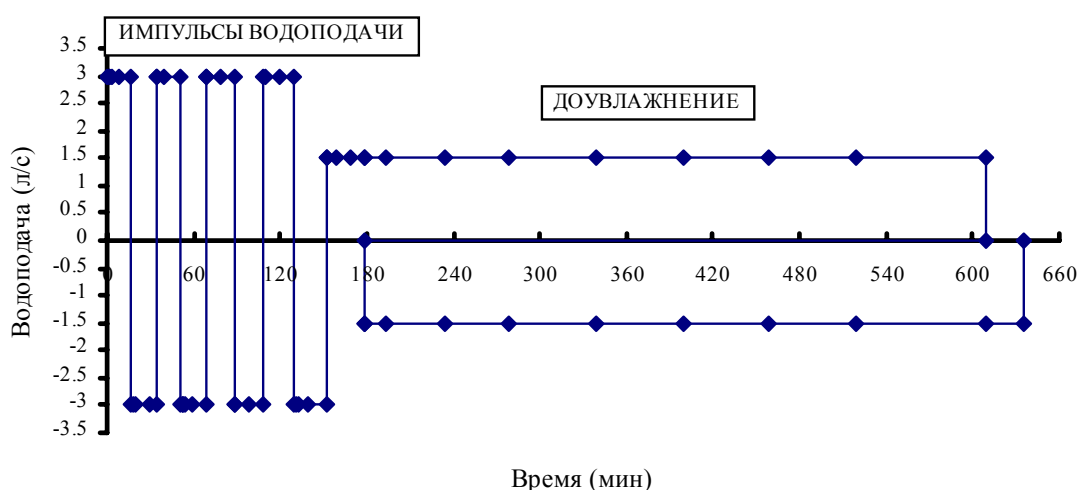


Рис.2. Режим дискретного полива для варианта Fb (положительные значения относятся к поливу правого плеча, а отрицательные – к левому плечу)

Процедуры полевой оценки

Почвенные характеристики, относящиеся к шести генетическим горизонтам, полученные при почвенных изысканиях, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Водно-физические характеристики почвы

Генетический горизонт	Мощность слоя (см)	Объем. вес (г/см ³)	Порозность (%)	Полевая влагоемкость FC		Влажность завядания WP		Доступная почвенная влага ASW	
				(м ³ м ⁻³)	(мм)	(м ³ м ⁻³)	(мм)	(м ³ м ⁻³)	(мм)
0-25	25	1,24	52,3	0,335	83,8	0,170	42,5	0,165	41,3
25-45	20	1,47	42,5	0,325	65,0	0,165	33,0	0,160	32,0
45-66	21	1,43	47,4	0,297	62,4	0,165	34,7	0,132	27,7
66-83	17	1,54	41,5	0,241	41,0	0,108	18,4	0,133	22,6
83-94	11	1,30	49,0	0,318	35,0	0,187	20,6	0,131	14,4
94-100	6	1,58	37,4	0,35,0	21,0	0,190	11,4	0,160	9,6
0-100	100	1,40	46,2	0,308	308,1	0,161	160,5	0,148	147,6

Объемный вес почвы (γ , г/см³) определялся по методике, описанной Walker (1989). Влажность почвы при полевой влагоемкости (FC) и влажность завядания (WP) (мм/м) определялись в лаборатории, с использованием пресс-мембраны при $-1/3$ атм и -15 атм всасывающего давления, соответственно. Данные в таблице 2 показывают, что почва обладает высокой водоудерживающей способностью и хорошо подходит для поверхностного полива относительно высокими поливными нормами и с относительно длительными межполивными интервалами.

Для оценки дискретного полива по бороздам использовалась методология Walker and Skogerboe (1987), Walker (1989), ASAE (2003) и Павлова и Хорста (1995). Измерения включали оценку: степени спланированности земель, расходов водоподачи в борозду и поверхностного сброса из борозды, поперечного сечения борозды, добега и спада поливной струи, гидравлической шероховатости и инфильтрации. Сходные методологии упоминаются в статье Хорста и его соавторов (2005).

В этом исследовании использовалось уравнение инфильтрации Костякова, принятое в модели поверхностного полива SIRMOD (ISED, 1989):

$$Z = k\tau^\alpha + f_0\tau \quad [1]$$

где Z – суммарная инфильтрация на единицу длины борозды ($\text{м}^3/\text{м}$), τ – эффективное время впитывания (мин); α и k – эмпирические параметры и f_0 – эмпирическая основная скорость инфильтрации ($\text{м}^3/\text{мин}/\text{м}$). Наилучшие значения параметров были получены после нескольких итераций модели SIRMOD с целью минимизирования суммы квадратов отклонений между наблюдаемыми и расчетными значениями времени добега и спада (Calejo *et al.*, 1998). Параметр шероховатости n сохранялся постоянным.

Исходные значения параметров инфильтрации f_0 , α и k определялись с использованием метода «две точки» (Walker and Skogerboe, 1987). Уравнение инфильтрации Костякова также используется моделью SIRMOD в условиях эффекта дискретности (см. ниже с индексом s), который, как предполагается, имеет место после третьего импульса:

$$Z_s = k_s \cdot \tau^{\alpha_s} + f_s \cdot \tau \quad [2]$$

В течение второго импульса применяются оба уравнения [1] и [2], балансируемых расстоянием, основанным на факторе FP:

$$FP = \left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{x_{i-1} - x}{x_{i-1} - x_{i-2}} \right)^\lambda & (\text{if } x_{i-2} \leq x \leq x_{i-1}) \\ 0 & (\text{if } x < x_{i-2}) \\ 1 & (\text{if } x > x_{i-1}) \end{array} \right\} \quad [3]$$

где x – расстояние расчетного интервала от начала в течение шага по времени i , и λ – эмпирический фактор, обычно принимающий значение 3 (ISED, 1989). Это дает следующее уравнение:

$$Z = [k + (k - k_s) FP] \tau^{\alpha + (\alpha - \alpha_s) FP} + [f_0 + (f_0 - f_s) FP] \tau \quad [4]$$

Измерения влажности почвы производились перед поливом и через 2-3 дня после полива. Применявшаяся методология описывалась Horst *et al.* (2005). Данные о влажности почвы использовались для упрощенного водного баланса при оценке требуемого слоя полива (Z_{req}). Предполагалось, что максимальный из наблюдавшихся дефицитов почвенной влаги являлся наилучшей оценкой для Z_{req} . Для всех поливов, глубина корнеобитаемой зоны RD (м) предполагалась равной 0,7 м, основываясь на фенологической оценке максимального развития корней хлопчатника на исследуемом поле.

Эксплуатационные показатели

Эксплуатационные показатели, такие же, как и в предыдущем исследовании (Хорст и др., 2005): эффективность использования поливной нормы E_a (%) и равномерность распределения увлажнения DU (%). DU характеризует систему орошения, а E_a является показателем управления эксплуатационными характеристиками (Pereira and Trout, 1999; Pereira *et al.*, 2002a). Кроме того, для охарактеризования дискретного полива также использовались показатели E_r (%), эффективность водопотребления, IE (%), эффективность инфильтрации, TWR (мм или %), объем конечного сброса, и DPR (мм; %), объем глубинной фильтрации (Walker and Skogerboe, 1987; ASAE, 2003).

E_r (%) оценивался так:

$$E_r = \frac{Z_{avg(\text{root zone})}}{Z_{req}} \times 100 \quad [5]$$

а IE (%) выводился из:

$$IE = \frac{Z_{avg}}{D} \times 100 \quad [6]$$

где Z_{req} – средний слой (мм), требуемый для подпитки корнеобитаемой зоны в наименее увлажненной четверти поля; D – средний слой (мм), поданный на орошаемую площадь; Z_{avg} – средний слой инфильтрации на поле (мм); $Z_{avg(\text{root zone})}$ – средний слой воды впитавшейся в корневой зоне на всей орошаемой площади (мм).

DPR рассчитывался из разницы между Z_{avg} и $Z_{avg(\text{root zone})}$, которые оценивались из расчета слоя впитавшейся воды в течение эффективного времени инфильтрации в каждой точке i , т. е. через каждые 20 м по длине борозды, используя откалиброванное уравнение Костякова:

$$Z_i = k[t_r - (t_a)_i]^a + f_o[t_r - (t_a)_i] \quad [7]$$

где t_r и t_a – соответственно время добега и спада (мин) в точке i . При расчетах использовалась модель SIRMOD. Аналогичная процедура применялась для оценки Z_{lq} .

Средний слой поданной на полив воды D (мм) рассчитывался из:

$$D = \frac{q_{avf} \times 60 \times t_{co}}{L \times s} \quad [8]$$

где q_{avf} – средний расход водоподачи в борозду (л/с) в течение полива; t_{co} – длительность водоподачи (мин), и s – ширина междурядья (м).

Средний слой концевого сброса V_{out} (мм) вычислялся из:

$$V_{out} = \frac{q_{out} \times 60 \times t_{out}}{L \times s} \quad [9]$$

где q_{out} – средний расход сброса в конце борозды (л/с) за время сброса t_{out} (мин). TWR рассчитывался из V_{out} .

Результаты

Уклон и форма борозд

Средний наблюдаемый уклон борозд составлял $S_{avg} = 0,00284$ м/м. Типичные поперечные профили борозд при дискретной и непрерывной водоподаче до и после полива приведены на рис. 3. Можно отметить, что если при поливе непрерывной струей происходит размыв придонной части борозды (рис. 3а), то в борозде, водоподача в которую регулируется дискретно, происходит лишь переформирование профиля и придонная часть ложа борозды заполняется почвой с бортов борозды (рис. 3б). Чередование импульсов водоподачи и пауз способствует меньшей подверженности ложа борозды эрозии. Это обстоятельство способствует более лучшим условиям для сохранения почвенного плодородия при дискретной водоподаче даже при высоких величинах поливных струй $q_{inflow} = 2,4-3,0$ л/с.

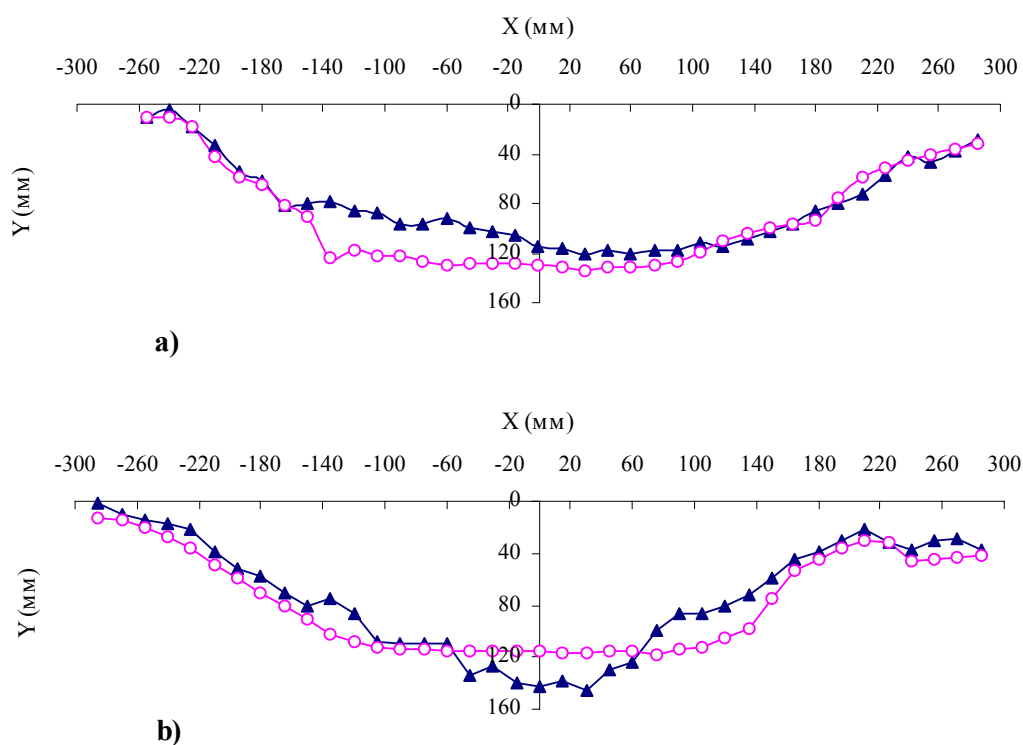


Рис. 3. Типичные поперечные профили борозд до (▲) и после (○) полива (а – при непрерывной водоподаче; б - при дискретной водоподаче)

Гидрографы водоподачи-сброса

Измеренные расходы водоподачи и поверхностного сброса при обоих способах водоподачи приведены в таблице 3 и на рис. 4. Переменные имеют следующие обозначения:

$Q_{in(project)}$	расчетный расход водоподачи в период импульсов, л/с;
$Q_{in(average)}$	фактический средний расход водоподачи, л/с;
$P(project)$	расчетная доля истощения доступной почвенной влаги без водного стресса растений (Allen <i>et al.</i> , 1998);
$P(befor irr)$	фактическая доля истощения почвенной влаги перед поливом;
t_{co}	длительность полива, мин;
t_{surge}	длительность импульса водоподачи, мин;
$Q_{in-flow}$	фактический расход водоподачи в борозду, л/с;
L_{adv}	длина добега поливной струи, м;
$t_{out-flow}$	продолжительность поверхностного сброса, мин;
$Q_{out-flow}$	фактический расход сброса, л/с.

Таблица 3. Основные измеренные параметры поливов

	Поливы		Первый полив						Четвертый полив					
	Варианты		Fa-дискр, G-постоян, Fb-дискр.						Fa-Дискр. G-постоян. Fb-дискр.					
	# Борозд		17	18	19	20	21	22	17	18	19	20	21	22
	$Q_{in(project)}$ (л/с)		2,40	2,40	2,40	2,40	3,00	3,00	2,40	2,40	2,40	2,40	3,00	3,00
	$Q_{in(average)}$ (л/с)		1,45	1,45	2,41	2,41	1,79	1,79	1,47	1,52	2,40	2,35	1,71	1,71
	$P_{(project)}$ (%)		0,69		0,67		0,68		0,67		0,69		0,67	
	$P_{(befor irr)}$ (%)		0,45		0,54		0,49		0,42		0,44		0,40	
	t_{co} (МИН)		522	518	568	568	502	502	470	469	589	589	533	533
I цикл	t_{surge} (МИН)		18	18	155	149	16	16	18	18	101	94	17	17
	$Q_{in-flow}$ (л/с)		2,22	2,39	2,43	2,42	2,98	3,02	2,22	2,37	2,37	2,19	3,01	2,98
	L_{adv} (М)		84	88	320	320	80	78	80	90	320	320	80	92
II цикл	t_{surge} (МИН)		26	26			22	22	28	28			17	17
	$Q_{in-flow}$ (л/с)		2,39	2,45			2,99	2,98	2,41	2,39			2,98	2,95
	L_{adv} (М)		160	180			160	160	160	174			160	163
III цикл	t_{surge} (МИН)		29	29			29	29	29	29			20	20
	$Q_{in-flow}$ (л/с)		2,33	2,34			2,95	2,95	2,32	2,32			2,87	2,99
	L_{adv} (М)		240	268			240	242	240	240			236	240
IV цикл	t_{surge} (МИН)		29	24			31	31	36	36			22	22
	$Q_{in-flow}$ (л/с)		2,39	2,38			3,00	2,98	2,38	2,38			3,00	2,95
	L_{adv} (М)		320	320			320	320	320	316			320	300
Доувлажнение	t_{inflow} (МИН)		421	421	413	419	404	404	359	359	488	495	457	457
	$Q_{in-flow}$ (л/с)		1,20	1,20	2,40	2,40	1,50	1,50	1,20	1,20	2,40	2,38	1,50	1,50
	t_{adv} (МИН)		31	34			34	41	37	50			27	22
	L_{adv} (М)		320	320			320	320	320	320			320	320
Сброс	$t_{out-flow}$ (МИН)		502	491	445	452	472	464	440	437	535	534	518	516
	$Q_{out-flow}$ (л/с)		0,68	0,77	0,95	1,10	0,34	0,50	0,62	0,59	1,11	1,12	0,88	0,88

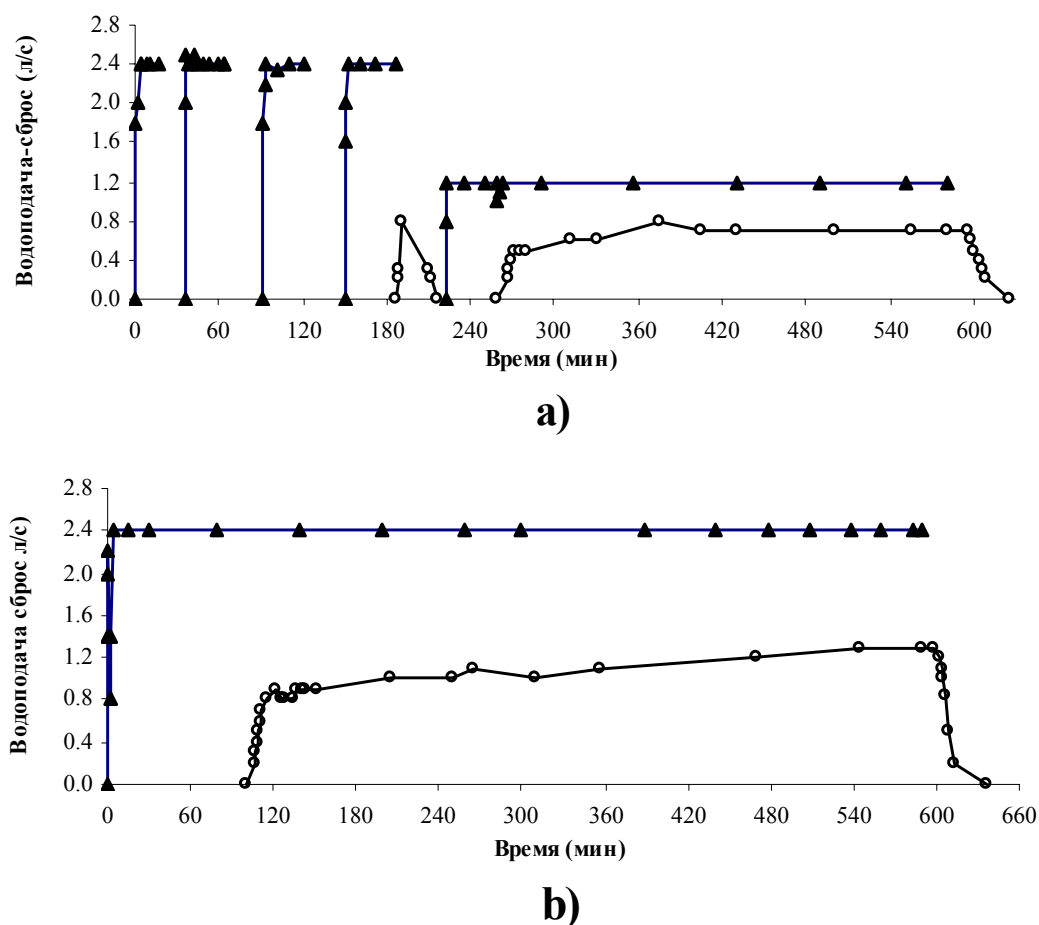


Рис. 4. Типичные гидрографы «водоподача (▲) – сброс (○)»: при дискретной (а) и непрерывной (б) водоподаче

Кривые добега и спада при дискретной и непрерывной водоподаче

Сравнение кривых добегов при дискретной и непрерывной водоподаче поливных струй с $q = 2,4$ л/с для первого и четвертого поливов (рис. 5) показывает, что в начале сезона вегетационных поливов, когда еще почва достаточно рыхлая, добег происходит быстрее при дискретной водоподаче. В более поздний период вегетации длительность добега примерно одинакова при обоих способах регулирования водоподачи, поскольку борозды сглаживаются. Типичные кривые «добегов» и «спадов» поливных струй при дискретной и непрерывной водоподаче в борозды показаны на рис. 6.

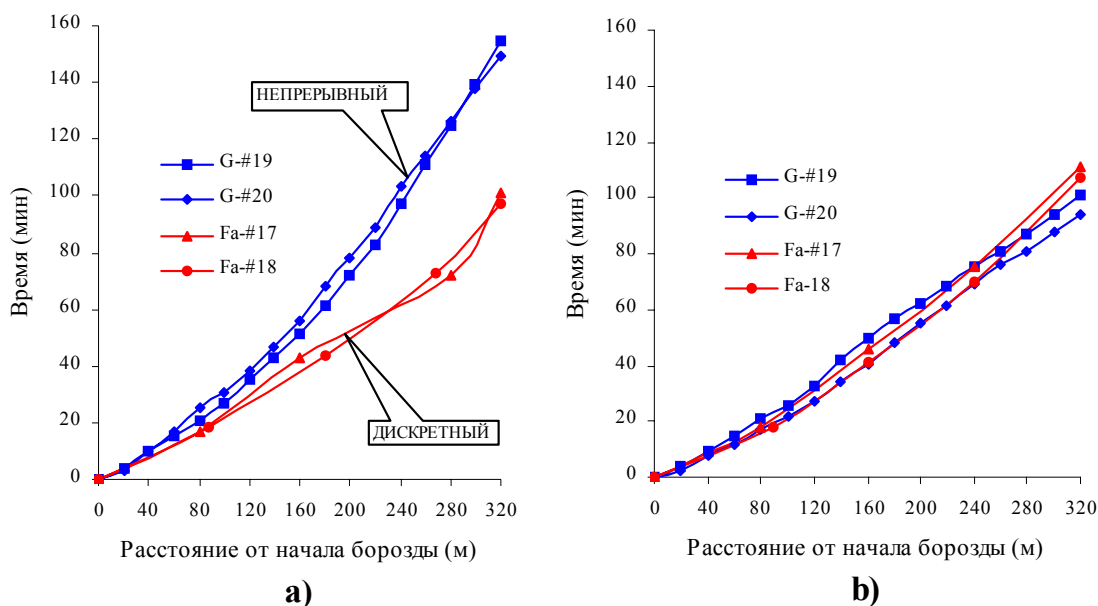


Рис. 5. Сравнение добегов поливных струй при непрерывной и дискретной водоподаче расхода $q = 2,4$ л/с (а – первом поливе; б – при четвертом поливе)

Гидравлическая шероховатость и инфильтрация

Значения коэффициента гидравлической шероховатости n практически одинаковы для всех вариантов. При дискретной водоподаче коэффициент шероховатости изменялся от $n = 0,020$ до $n = 0,022$, в то время как при непрерывной водоподаче изменялся от $n = 0,020$ до $n = 0,021$.

Расчетная основная скорость инфильтрации f_0 и параметры инфильтрации k и α представлены в таблице 4. Основная скорость инфильтрации f_0 для борозд с дискретной водоподачей была почти вдвое меньше аналогичного показателя для варианта с непрерывной водоподачей, изменяясь в диапазоне от $0,000128$ м³/мин/м (для первого полива) до $0,000098$ м³/мин/м (для четвертого полива). Значительная вариация f_0 при первом поливе ($CV=0,48$) вероятно связана с разной степенью уплотненности борозд и комковатостью в этот период. При четвертом поливе вариация была значительно ниже ($CV=0,15$). Для борозд с непрерывной водоподачей f_0 изменялась от $0,000210$ до $0,000220$ м³/мин/м, т. е. намного меньше, чем при дискретной водоподаче.

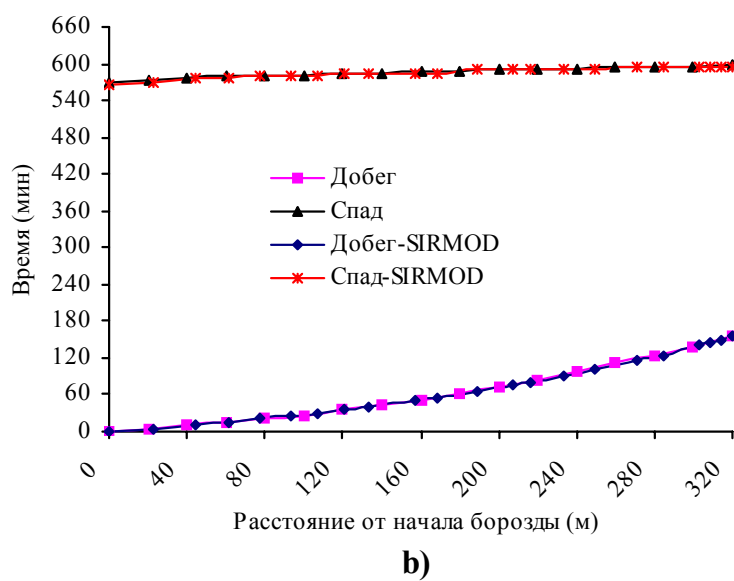
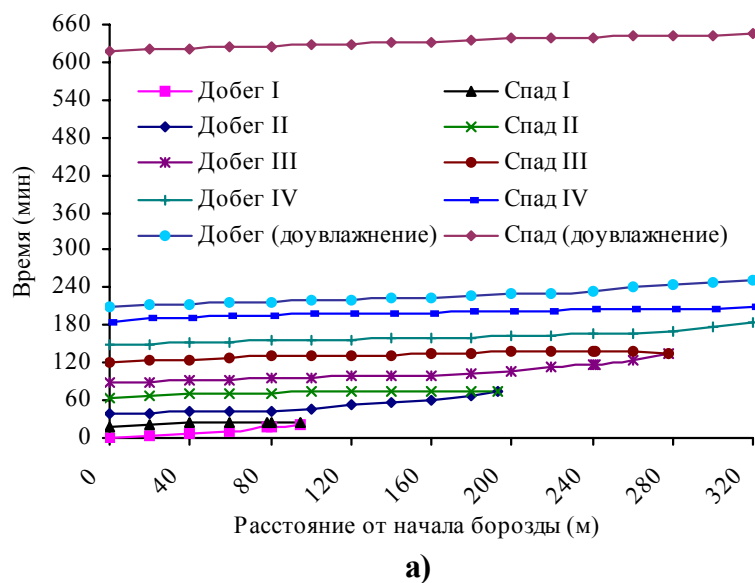


Рис. 6. Типичные траектории «добег-спад»
(а – при дискретной водоподаче; б - при непрерывной водоподаче)

Таблица 4. Оцененные значения параметров инфильтрации

		f_0 (м ³ /мин/м)	k (м ³ /мин ^α /м)	α
Все борозды при дискретной водоподаче и все поливы	Среднее	0,000113	0,0028	0,353
	Стандартное отклонение	0,00004	0,0004	0,114
	CV	0,36	0,14	0,32
Все борозды при дискретной водоподаче, первый полив	Среднее	0,000128	0,0030	0,383
	Стандартное отклонение	0,00006	0,0005	0,152
	CV	0,48	0,15	0,40
Все борозды при дискретной водоподаче, четвертый полив	Среднее	0,000098	0,0026	0,322
	Стандартное отклонение	0,00001	0,0003	0,069
	CV	0,15	0,10	0,21
Все борозды при поливе постоянной струей и все поливы	Среднее	0,000215	0,0159	0,166
	Стандартное отклонение	0,00001	0,0048	0,058
	CV	0,05	0,30	0,35
Все борозды при поливе постоянной струей, первый полив	Среднее	0,000210	0,0185	0,194
	Стандартное отклонение	0,000	0,0063	0,081
	CV	0,00	0,34	0,42
Все борозды при поливе постоянной струей, четвертый полив	Среднее	0,000220	0,0132	0,138
	Стандартное отклонение	0,00001	0,0007	0,018
	CV	0,06	0,06	0,13

Значения параметра инфильтрации k при дискретном поливе, осредненные для двух фаз полива («добегание» и «доувлажнение» с постоянной водоподачей уменьшенного наполовину расхода) в пять-шесть раз ниже аналогичного параметра для варианта полива с непрерывной водоподачей. Средние значения параметра k изменялись от 0,0030 м³/мин^α/м (для первого полива) до 0,0026 м³/мин^α/м (для четвертого полива) с CV = 0,10 и CV = 0,15 соответственно. В варианте с непрерывной водоподачей значения $k = 0,0185$ м³/мин^α/м (для первого полива) и $k = 0,0132$ м³/мин^α/м (для четвертого полива). При первом поливе отмечается значительная вариация параметров инфильтрации для обоих вариантов дискретного и непрерывного. Параметр α вдвое больше при дискретной водоподаче в сравнении с непрерывной, что объясняется спецификой дискретного полива.

Как ранее упоминалось, различия в параметрах инфильтрации для дискретного полива и полива непрерывной струей продуцируют, как это показано на рис. 7, различающиеся кривые инфильтрации.

Общей тенденцией для всех вариантов регулирования водоподачи в борозды является снижение варибельности параметров инфильтрации от начала к концу вегетации, что связано с «нивелирующим» воздействием

последующих поливов на процессы переформирования почвенных агрегатов.

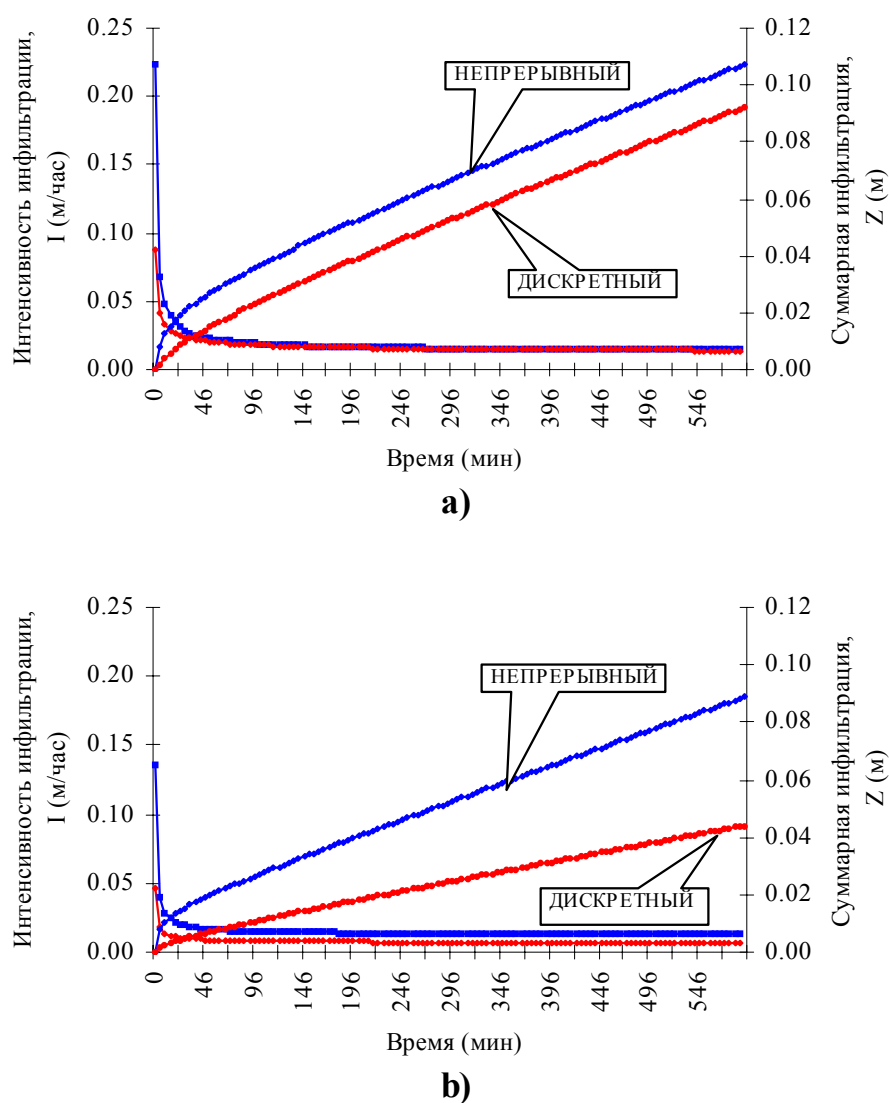


Рис. 7. Типичные кривые инфильтрации при непрерывной (борозда 19) и дискретной (борозда 21) водоподаче: а) при первом поливе; б) при четвертом поливе

Характеристики орошения и продуктивность использования воды

Эксплуатационные характеристики полива

Первый вегетационный полив проводился, когда дефицит влажности в корнеобитаемой зоне (SMD) был относительно мал, от 55,2 мм (вариант Fa) до 62,0 мм (вариант G), а допустимое истощение легкодоступной почвен-

ной влаги RAW (Allen *et al.*, 1998), изменялось от RAW = 83,1 мм (вариант G) до 84,7 мм (вариант Fb). Четвертый вегетационный полив также проводился при малом SMD, между 50,0 мм (вариант Fb) и до 55,0 мм (вариант G), RAW при этом изменялось от 83,3 мм (вариант Fa) до 86,3 мм (вариант G). Эти данные идентифицируют ситуацию, когда график поливов не оптимален, что обуславливает случаи низкой эффективности использования поливной нормы. Результаты для обоих поливов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Эксплуатационные характеристики первого и четвертого поливов хлопчатника

Дата	Первый полив						Четвертый полив					
	11.06.2002		13.06.2002		12.06.2002		31.07.2002		02.08.2002		01.08.2002	
Вариант	Fa		G		Fb		Fa		G		Fb	
# Борозды	17	18	19	20	21	22	17	18	19	20	21	22
Способ водоподачи	Дискретный		Непрерывный		Дискретный		Дискретный		Непрерывный		Дискретный	
$Q_{in(rated)}$ (л/с)	2,4/1,2	2,4/1,2	2,4	2,4	3,0/1,5	3,0/1,5	2,4/1,2	2,4/1,2	2,4	2,4	3,0/1,5	3,0/1,5
$Q_{in(average)}$ (л/с)	1,45	1,45	2,41	2,41	1,79	1,79	1,47	1,52	2,40	2,35	1,71	1,71
t_{co} (мин)	522	518	568	568	502	502	470	469	589	589	533	533
D (мм)	79,0	78,0	143	142	93,8	93,4	71,9	74,4	147	144	95,0	94,9
Z_{reqq} (мм)	55,2	55,2	62,0	62,0	61,0	61,0	52,2	52,2	55,0	55,0	50,0	50,0
Z_{avg} (мм)	43,6	38,5	98,4	90,8	76,9	71,5	43,5	47,8	85,2	81,8	47,3	47,8
Z_{lq} (мм)	40,2	36,5	91,0	84,2	71,7	65,7	39,3	42,3	81,8	78,5	45,5	45,4
TWR (мм)	35,4	39,5	44,1	51,6	16,9	24,3	28,4	26,6	61,9	62,5	47,7	47,1
(%)	45	51	31	36	18	26	40	36	42	43	50	50
DPR (мм)	0,0	0,0	46,4	28,8	15,9	8,2	0,0	0,0	30,1	26,8	0,0	0,0
(%)	0	0	26	20	17	9	0	0	20	19	0	0
E_a (%)	51	47	43	44	65	65	55	59	37	38	48	48
IE (%)	55	49	43	44	65	65	60	64	37	38	50	50
E_r (%)	79	70	100	100	100	100	83	92	100	100	95	96
DU (%)	92	95	92	93	93	92	90	88	96	96	96	95

Результаты первого полива можно прокомментировать следующим образом:

- Равномерность DU во всех вариантах имеет высокие значения от 92 до 95 %. В противоположность этому, эффективность E_a в основном ниже, потому что небольшой SMD требует тщательного контроля сроков и длительности полива, что затруднительно при существующей практике водоснабжения орошаемых земель. Поэтому слой водоподачи на полив D намного выше, чем Z_{req} . Переполив объясняется попытками фермера предотвратить водный стресс растений в межполивной период. Следовательно, возможные улучшения эксплуатационных характеристик полива, главным образом, E_a связаны с оптимизацией графика поливов
- В варианте с непрерывной водоподачей (вариант G) водоподача была в 1,5 раза выше, чем на варианте дискретного полива. Это обусловлено

тем фактом, что для вариантов с дискретной водоподачей расход был наполовину снижен в течение фазы доувлажнения, а длительность водоподачи t_{co} была меньше

- Объем концевго сброса значительно выше в варианте с непрерывной водоподачей (вариант G), составляя $TWR > 30\%$. Однако, высокий TWR наблюдался и в варианте дискретного полива (вариант Fa), что объясняется низкими значениями установившейся инфильтрации ($f_o = 0,000075 \text{ м}^3/\text{мин}/\text{м}$). Ожидаемые преимущества дискретного полива не подтвердились в этом варианте, зато подтвердилась проблема вариабельности водно-физических свойств почвы, и сложности управлять поливом на этих почвах соответствующим образом
- Слой профильтровавшейся воды в варианте дискретного полива Fa был ниже требовавшегося из-за низких значений установившейся инфильтрации. Как следствие, глубинная инфильтрация за пределы корнеобитаемой зоны (DPR) была нулевой. Напротив, в варианте с непрерывной водоподачей G, DPR превышала 20%. В варианте дискретного полива Fb за счет некоторой глубинной фильтрации за пределы корнеобитаемой зоны (рис. 8) на всем поле было обеспечено Z_{req} .

Данные четвертого полива (таблица 5) показывают аналогичные эксплуатационные характеристики и проблемы:

- DU высокое ($DU > 95\%$) для всех вариантов, за исключением варианта с дискретным поливом Fa вследствие проблемы, вызванной низкой инфильтрацией; результаты показывают, что расход водоподачи был велик для этих почв
- E_a в основном низкий, главным образом для варианта с непрерывной водоподачей вследствие избыточной длительности водоподачи, что привело к очень высоким поливным нормам-брутто, намного превышающим Z_{req} . Как ранее отмечалось, это явилось следствием неоптимального графика поливов
- Объем концевго сброса устойчиво высок в варианте с непрерывной водоподачей G и в варианте дискретного полива Fb. Для этого варианта это объясняется в основном значительным снижением инфильтрации после первого полива, с большим расходом водоподачи
- В варианте с непрерывной водоподачей (вариант G), как и при первом поливе, велика глубинная инфильтрация за пределы корнеобитаемой зоны, но нулевая для дискретного полива (рис. 8).

Проблемы улучшения эксплуатационных характеристик полива

Факторы, посредством которых фермер может управлять системой, для того чтобы повысить DU и E_a , можно описать упрощенными функциональными зависимостями (Pereira and Trout, 1999):

$$DU = f(q_{in}, t_{co}) \quad [10]$$

и

$$E_a = f(q_{in}, t_{co}, SMD) \quad [11]$$

обозначения были определены ранее. Следовательно, из предыдущего анализа становится очевидным, что для улучшения эксплуатационных характеристик полива можно принять во внимание следующие факторы:

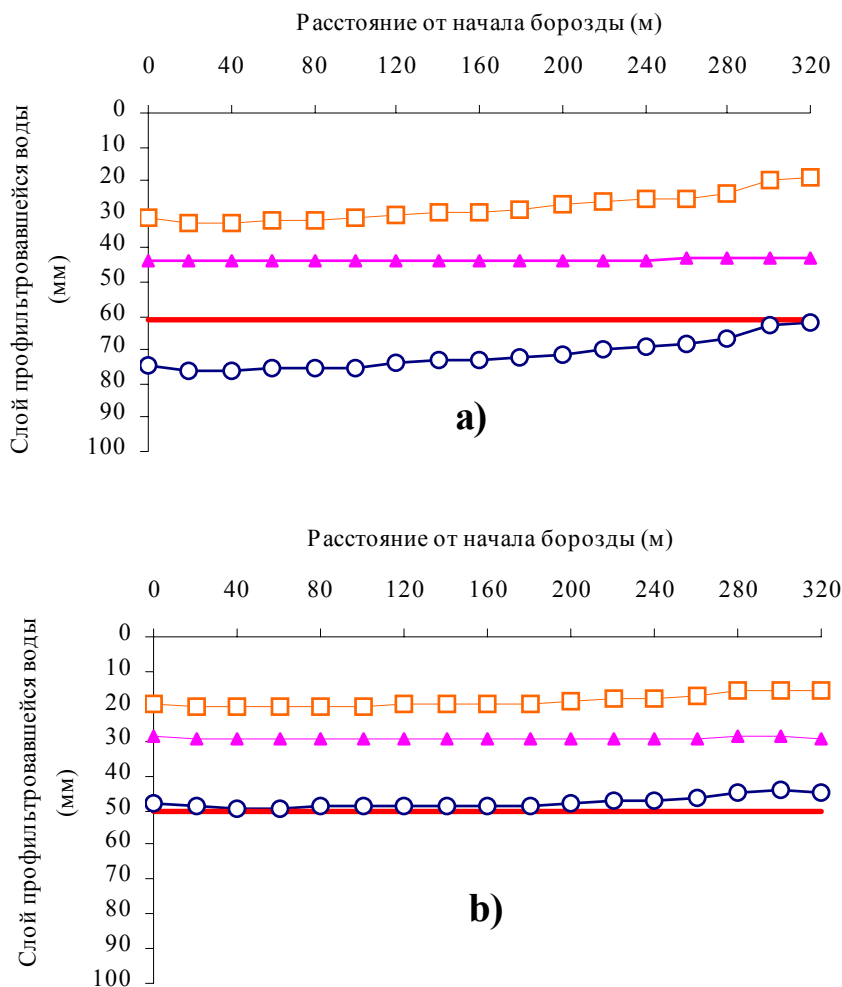


Рис. 8. Профили инфильтрации при дискретной водоподаче (вариант Fb) с различной инфильтрацией в течение дискретной фазы (□) и фазы доувлажнения (▲); (○ – суммарная инфильтрация); (— – поливная норма): а) при первом поливе; б) при четвертом поливе

- *Полив непрерывной струей:* (а) сокращение длительности водоподачи (t_{co}) соответственно применяемому расходу, для того, чтобы снизить чрезмерную разницу между Z_{req} и D ; (б) применение меньших расходов водоподачи, особенно для почв с низкой инфильтрацией и, как следст-

вие, снижение конечного сброса. В предыдущем исследовании (Хорст и др., 2005) лучшие результаты были получены для $q_{in} = 1,8$ л/с при поливе через борозду и $q_{in} = 1,2$ л/с при поливе в каждую борозду; однако, в нынешнем эксперименте использовались традиционные расходы водоподдачи, явившиеся чрезмерными

- *Дискретный полив:* (а) сокращение длительности водоподдачи t_{co} в случае низкой инфильтрации, аналогично указанному выше; (б) дискретность водоподдачи в течение фазы доувлажнения вместо деления расходов между правым и левым плечами
- *Дискретный полив и полив непрерывной струей:* отсрочка поливов до тех пор, пока SMD не станет близким RAW, тем самым, увеличивая Z_{recq} до уровня, близкого к более приемлемым значениям D. Следует принимать долю дострессового истощения почвенной влаги p от 0,6 до 0,7.

Были выполнены расчеты для варианта с непрерывной водоподачей (вариант G) с сокращением ее длительности на 160-180 мин. Результаты приведены в таблице 6, сравнивающей показатели эксплуатационных характеристик, относящихся к фактической и улучшенной ситуациям; сопоставление эпюр инфильтрации с фактическими и рассчитанными условиями приведено на рис. 9.

Таблица 6. Рассчитанные характеристики полива непрерывной струей (вариант G) при уменьшении длительности полива

Дата	Первый полив 13.06.2002				Четвертый полив 02.08.2002			
	19		20		19		20	
# Борозды	фактический		улучшенный		фактический		улучшенный	
$q_{in(rated)}$ (л/с)	2.4	2.4			2.4	2.4		
$q_{in(average)}$ (л/с)	2.41	2.41	2.41	2.41	2.40	2.35	2.39	2.30
t_{co} (мин)	568	568	390	412	589	589	430	410
D (мм)	143	142	98	103	147	144	107	98
Z_{recq} (мм)	62.0	62.0	62.0	62.0	55.0	55.0	55.0	55.0
Z_{avg} (мм)	98.4	90.8	73.7	70.9	85.2	81.8	59.4	59.7
Z_{lq} (мм)	91.0	84.2	65.9	64.2	81.8	78.5	56.2	56.4
TWR (мм)	44.1	51.6	24.2	32.4	61.9	62.5	37.2	34.4
(%)	31	36	25	31	42	43	35	35
DPR (мм)	46.4	28.8	11.7	8.9	30.1	26.8	15.0	8.7
(%)	26	20	12	9	20	19	14	9
E_a (%)	43	44	63	60	37	38	51	56
IE (%)	43	44	63	60	37	38	51	56
E_T (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
DU (%)	92	93	89	91	96	96	95	94

Сокращение t_{co} на 160-180 минут приводит к снижению поливных норм на 40-45 мм, тем самым обеспечивая водосбережение на 30 %, что в сумме за весь сезон дает около 200 мм. Снижаются и глубинная фильтра-

ция, и сброс. В результате, E_a повышается более, чем на 15 %, но незначительно, на 2 %, снижается DU.

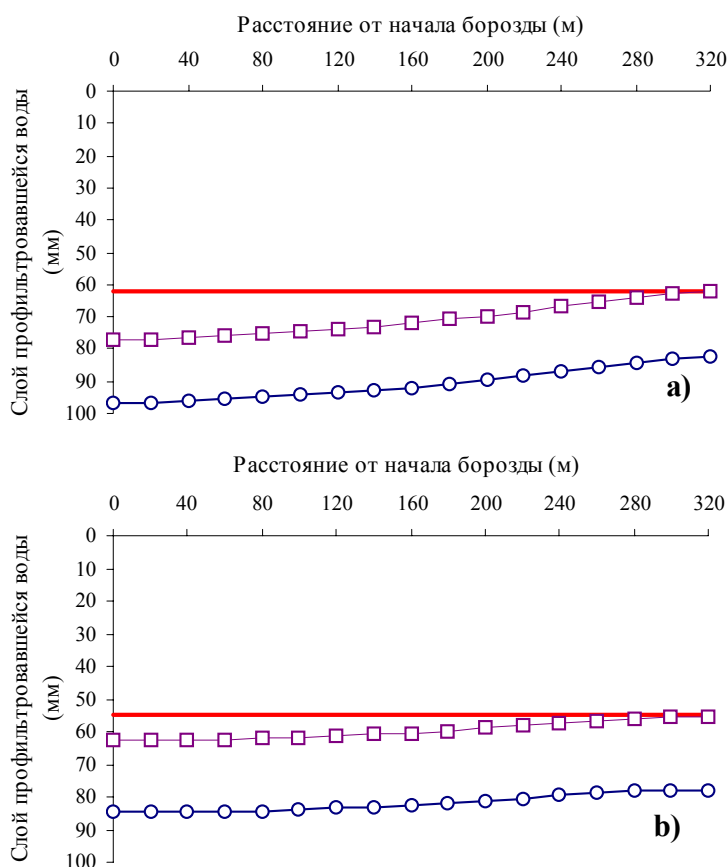


Рис.9. Профили инфильтрации при непрерывной водоподаче (вариант G): сравнение фактических (○) и расчетных (□) расходов (— — поливная норма): при первом (a) и четвертом (b) поливах

Проблемы повышения продуктивности использования воды

В условиях дефицита орошаемых земель в Ферганской долине фермеры ставят своей основной целью повышение продуктивности использования земель, а не продуктивности использования воды. Это является причиной того, почему они, как показано в этом исследовании, стремятся переполивать. В противоположность фермерам, расположенным в низовьях бассейна, здесь фермеры не ощущают существенного недостатка воды. При таком положении существуют определенные трудности при внедрении здесь приемов водосбережения.

Шредер и др. (1977) предложили зависимость «урожайность-вода» для хлопчатника $Y_a/Y_{\max} = f(Z_a/Z_{\max})$, где: Y_a — фактическая урожайность хлопчатника (кг/га); Y_{\max} — максимальная урожайность хлопчатника (кг/га);

Z_a – фактическое водопотребление хлопчатника; и Z_{\max} – требуемое водопотребление для получения максимального урожая (рис. 10). Это подтверждает то, что «дефицитное» орошение практически осуществимо, так как снижение водообеспеченности хлопчатника на 5-10 % понижает урожайность не более чем на 2-4 %.

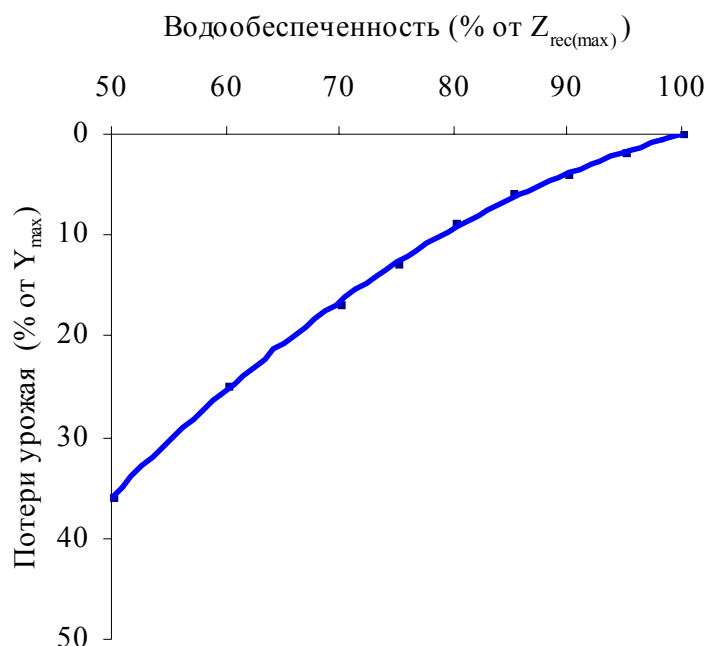


Рис. 10. Зависимость «вода-урожай» для хлопчатника (Шредер и др., 1977)

На основе вышеупомянутых исследований характеристик орошения и описанных в нашей предыдущей статье (Хорст и др., 2005), в вегетационный период 2003 года были проведены полевые исследования четырех, приведенных в таблице 7, вариантов полива хлопчатника по установлению связей «вода-урожай» и продуктивность использования воды (WP). Сравнивались варианты дискретного регулирования водоподдачи с непрерывной водоподдачей и полив с чередованием поливаемых и сухих междурядий с поливом в каждую борозду: ЕС - полив постоянной струей в каждую борозду; ES - дискретный полив в каждую борозду; АС - полив постоянной струей через борозду; AS - дискретный полив через борозду. Каждый из вариантов относился к различной схеме организации бороздкового полива. Каждый из вариантов обрабатывался в трех повторностях, площадь под каждой из повторностей составляла 0,36 га. Число вегетационных поливов во всех вариантах в период с 15.06.03 по 12.09.03 - шесть.

Наибольшая продуктивность использования оросительной воды $WP = 0,61 \text{ кг/м}^3$ соответствовала варианту дискретный полив с чередованием поливаемых и сухих междурядий (AS), где также использовалось меньше воды, а урожай относительно среднего для всех вариантов уменьшился

лишь на 100 кг. В сравнении с вариантом традиционного полива непрерывной струей в каждую борозду (ЕС) вариант АS использовал на 3890 м³/га (44 %) меньше, а урожайность уменьшилась лишь на 380 кг/га (11 %). На вариантах ЕС и АС использовалось практически одинаковое количество воды и получены близкие показатели урожайности и продуктивности использования воды.

Таблица 7. Затраты воды (D), фактическая урожайность (Y_a) и продуктивность использования воды (WP) при четырех способах полива хлопчатника

Схемы полива	D	Изменения водоподдачи относительно среднего	Y _a	Изменения урожайности относительно среднего	WP	Изменения продуктивности оросительной воды относительно среднего
	(м ³ /га)	(%)	(кг/га)	(%)	(кг/м ³)	(%)
ЕС	8813	31	3391	9	0,38	-20
ЕС	6925	3	3041	-2	0,44	-8
АС)	6225	-7	2988	-4	0,48	0
AS	4922	-27	3010	-3	0,61	28
Среднее	6721		3108		0,48	

Характеристики использования воды на уровне поля

Доля потребленной оросительной воды от использованной на уровне поля за вегетационный период $WCF_{(field)}$, представляющая долю водопотребления сельхозкультурой от общего объема использованной воды (Pereira et al., 2002a) определялась из соотношения:

$$WCF_{(field)} = \frac{ET_a}{(D + P)} \quad [12]$$

где ET_a – фактическое водопотребление хлопчатника (мм), которое обеспечивает урожайность хлопчатника Y_a ; D – суммарный слой водоподдачи (мм); и P – атмосферные осадки (мм); все относится к периоду вегетации.

Учитывая, что для почв Ферганской долины требуется промывная доля LF , доля полезно используемой воды $BWUF_{(field)}$ может быть представлена, как:

$$BWUF_{(field)} = \frac{ET_a \left(1 + \frac{LF}{100}\right)}{(D + P)} \quad [13]$$

где LF соответствует приблизительно 5 % для большинства почв в рассматриваемом контуре орошаемых земель.

Сравнение оценок показателей $WCF_{(field)}$ и $BWUF_{(field)}$ для варианта полива непрерывной струей в каждую борозду (EC) с вариантами полива через борозду (AC) и полива через борозду с дискретным регулированием водоподдачи (AS) приведено в таблице 8. Также включено соотношение ET_a/ET_{max} , где ET_{max} – водопотребление хлопчатника на максимальный уровень урожайности ($ET_{max} = 693$ мм в соответствии с расчетами Чолпанкулова и его соавторов, 2005); Y_a – фактическая урожайность (кг/га); и Y_{max} – максимальная урожайность хлопчатника в условиях центральной части Ферганской долины (3600 кг/га).

Таблица 8. Сравнительная эффективность использования воды на уровне поля при поливе в каждую борозду и через борозду

Варианты полива	ET_a (мм)	ET_a/ET_{max} (%)	Y_a (кг/га)	Y_a/Y_{max}	D (мм)	P (мм)	$WCF_{(field)}$	$BWUF_{(field)}$
EC	598	86	3391	0,94	881	70	0,63	0,66
AC	480	69	2988	0,83	623	70	0,69	0,72
AS	480	69	3010	0,84	492	70	0,85	0,89

Наивысшие значения долей продуктивного водопотребления и полезно использованной воды соответствовали варианту дискретный полив с чередованием поливаемых и сухих междурядий (AS), соответственно 0,85 и 0,89 при относительном дефиците ET в 31 % и относительном снижении урожайности в 16 %. Следующие лучшие результаты относятся к варианту непрерывного полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий (AC), показывающему аналогичные относительное ET и относительную урожайность, но более низкие значения $WCF_{(field)}$ и $BWUF_{(field)}$. Эти результаты показывают явное преимущество полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий перед поливом в каждую борозду, а также преимущество дискретной водоподдачи перед непрерывной.

Заключение

Данное исследование, наряду с ранее описанными Хорстом и др., (2005), показывает необходимость некоторых усовершенствований поверхностного полива по бороздам и их практическую осуществимость, не требующую существенных затрат на оборудование. Значительной экономии воды от 200 до 390 мм в течение вегетационного периода хлопчатника можно достигнуть при применении дискретного полива и полива с чередованием поливаемых и сухих междурядий. Однако, усовершенствования внутрихозяйственных оросительных систем требуются в сочетании с более совершенным графиком поливов, т.к. фермеры стремятся проводить поливы преждевременно и чрезмерными поливными нормами.

Полевые исследования обеспечили параметризацию моделей орошения, что обеспечивает широкое использование моделирования, а именно, средств поддержки решений SADREG (Гонсалвес и др., 2005) для усовершенствования внутрихозяйственных систем орошения в соответствии с преобладающими на орошаемых землях условиями. Исследования показали, что равномерность увлажнения при поливах, как правило, достигается высокая, но эффективность использования поливной нормы при этом низкая. Это указывает на то, что приоритет вмешательства относится к применению более целесообразных расходов водоподачи в борозду и длительности водоподачи в соответствии с преобладающими условиями инфильтрации, а также отсрочке поливов с целью достижения большего SMD к моменту полива, чему соответствуют не столь большие поливные нормы-брутто.

Дискретный полив продемонстрировал возможность снижения как глубинной фильтрации за пределы корнеобитаемой зоны, так и объема конечного сброса. Преимущества дискретного водоподачи особенно проявляются в начале сезона вегетационных поливов. Однако, отмеченная изменчивость водно-физических свойств почвы на орошаемых землях создает дополнительные трудности при назначении размера поливных струй и длительности полива.

Дискретный полив с чередованием поливаемых и сухих междурядий показывает наилучшие приемы водосбережения и повышения продуктивности использования воды. По сравнению с традиционным поливом непрерывной струей в каждую борозду использование воды снизилось на 3890 м³/га (44 %), а урожайность уменьшилась лишь на 380 кг/га (11 %), в то же время продуктивность использования оросительной воды была 0,61 кг/м³ (при 0,38 кг/м³ на традиционном поливе). Более того, доля продуктивного водопотребления на уровне поля составила 0,85.

Вместе с тем, важно осознать эти результаты в контексте региона с дефицитом воды, подверженного опустыниванию и где последствия изменения климата могут быть бедственными (Horst, 2002).

Выражение признательности

Выражаем благодарность Ш. Хамдамову, Л. Соколовой и Т. Ахмедову за помощь в проведении полевых работ, В. Дашиной за компьютерную обработку данных, О. Усмановой за перевод и П. Паредес за поддержку в управлении проектом и подготовку английской версии текста.

Библиография

Гонсалвес, Дж.М., Хорст, М.Г., Ролим, Дж., Мугал, А., 2005. SADREG – СППР (система поддержки принятия решений) при поверхностном орошении (в этом сборнике)

- Павлов, Г.Н. и Хорст, М.Г. 1995. Об одном методе расчета характеристик дискретного (импульсного) полива по бороздам. В: Духовный, В.А. (Ред.) Мелиорация и водное хозяйство, Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации им.В.Д.Журина (САНИИРИ), Ташкент, стр. 73-86.
- Пензин, М.П. и Терпигорев, А.А. 1977. К вопросу обоснования способа регулирования поливных струй при поливе по бороздам. В: Угрюмов А.В. (Ред.) Новое в технике и технологии полива, Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им.А.Н.Костякова (ВНИИГиМ), Москва, Выпуск 10, стр. 9-17.
- Терпигорев, А.А. 1983. Движение воды в бороздах при поливе дискретной струей на больших уклонах. В: Угрюмов А.В. (Ред.) Основные направления технического прогресса в области механизации и техники полива, ВНИИГиМ, Москва, стр. 129-134.
- Хамраев, Н.Р. и Юсупов, Т.Ю. 1980. Технология импульсного полива по бороздам. Ж. «Хлопководство». (Москва) 7: стр. 30-32 и 9: стр.30-33.
- Хорст, М.Г., 1989. Совершенствование технологических схем полива по бороздам в целях снижения затрат оросительной воды. В: Духовный, В.А. (Ред.) Совершенствование водосберегающей технологии и прогрессивной техники полива на орошаемых землях Средней Азии, САНИИРИ, Ташкент, стр. 92-100.
- Хорст, М.Г., Байков, Д.А., Дашина, В.В. и Ишанходжаева, Ш.А. 1990. Лактаев Н.Т. (Ред.) Рекомендации по районированию дискретной технологии поверхностного полива (на примере Узбекской ССР). Государственный кооперативный комитет Узбекской ССР по сельскому хозяйству, Ташкент, 52 стр.
- Хорст, М.Г., Шамуталов, Ш.Ш., Гонсалвес, Дж.М., Перейра, Л.С., 2005. Оценка совершенствований бороздкового полива и водосбережения при орошении хлопчатника (в этом сборнике).
- Чолпанкулов, Э.Дж., Инченкова, О.П., Перейра, Л.С., Паредес П., 2005. Стратегии режима орошения для решения проблемы дефицита воды (в этом сборнике).
- Шредер, В.Р., Васильев, И.К. и Трунова, Т.А. 1977. Гидромодульное районирование и расчет оросительных норм для хлопчатника в условиях аридной зоны. В: Кадыров, А.А. (Ред.) Вопросы проектирования и эффективности работы гидромелиоративных систем Средней Азии. САНИИРИ, Ташкент, Выпуск 8: стр.28-41.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes and D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation & Drainage Paper 56, Rome.
- ASAE, 2003. Evaluation of irrigation furrows, EP 419.1. In: ASAE Standards, ASAE, S. Joseph, MI. pp. 919-924.
- Calejo, M.J., Sousa, P.L. and Pereira, L.S. 1998. Evaluation of performance of surface irrigation systems: optimisation of infiltration and roughness parameters. In: Pereira, L.S. and Gowing, J.W. (Eds.) Water and the Environment:

- Innovation Issues in Irrigation and Drainage (1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon), E& FN Spon, London, pp. 140-148.
- ISED, 1989. SIRMOD, Surface Irrigation Simulation Software. User's Guide. Irrigation Software Engng. Div. (ISED), Dep. Agric. Irrig. Engng., Utah St. Univ., Logan.
- Horst, M.G. 2002. The possible ways to improve water use in irrigated agriculture in the Aral Sea basin in light of climate change. In: Dukhovny, V.A. (Ed.), Dialogue on Water and Climate: Aral Sea Basin Case Study, Scientific Information Center of Interstate Coordination Water Commission (SIC ICWC), Tashkent, pp. 60-90.
- Humpherys, A.S. 1989. Surge irrigation: 1. An overview. ICID Bulletin 38(2): 35-48.
- Li, Y.N. and Calejo, M.J. 1998. Surface irrigation. In: Pereira, L.S., Liang, R.J., Musy, A., Hann, M.J. (Eds.) Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the North China Plain. DER, ISA, Lisbon, pp. 236-303.
- Pereira, L.S. 1999. Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: A discussion. Agric. Water Manage. 40: 153-169.
- Pereira, L.S. and Trout, T.J. 1999. Irrigation methods. In: van Lier, H.N., Pereira, L.S. and Steiner, F.R. (Eds.) CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI: 297-379.
- Pereira, L.S., Cordery, I. and Iacovides, I. 2002a. Coping with Water Scarcity. UNESCO IHP VI, Technical Documents in Hydrology No. 58, UNESCO, Paris, 267 p.
- Pereira, L.S., Oweis, T. and Zairi, A. 2002b. Irrigation management under water scarcity, Agric. Water Manage. 57: 175-206.
- Stringham, G.E. and Keller, J. 1979. Surge flow for automatic irrigation. In: Irrigation and Drainage Division Specialty Conference, ASCE, New York, pp. 132-142.
- Varlev, I. 1971. Improvement in the Uniformity along the Furrows and Beds with Surge Irrigation. Scientific Works of Institute of Land Improvement, Sofia, Vol. XII: 5-21 (in Bulgarian).
- Varlev, I., Popova, Z. and Gospodinov, I. 1998. Furrow surge irrigation as a water saving technique. In: Pereira, L.S. and Gowing, J.W. (Eds.) Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage (1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon), E& FN Spon, London, pp. 131-139.
- Walker, W.R. 1989. Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 45, FAO, Rome.
- Walker, W.R. and Skogerboe, G. 1987. Surface Irrigation: Theory and Practice. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.