УПРАВЛЕНИЕ ОРОШЕНИЕМ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПРОЦЕССАМИ ОПУСТЫНИВАНИЯ В БАССЕЙНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

ОЦЕНКА И ИНСТРУМЕНТЫ

Под редакцией

проф. Л. С. Перейра
Центр агротехнических исследований,
Институт сельского хозяйства,
Технический университет Лиссабона,
Лиссабон, Португалия

проф. В. А. Духовного
Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной комиссии
Центральной Азии,
Ташкент, Узбекистан

инж. М. Г. Хорста
Среднеазиатский научно-исследовательский
институт ирригации им. В.Д. Журина,
Ташкент, Узбекистан

Vita Color

Ташкент 2005

УДК 681.5: 631.67+631.617
ББК 20.18
У 67

Под общей редакцией проф. Л. С. Перейра, проф. В. А. Духовного,
инж. М. Г. Хорста

Данные совместного исследовательского проекта
EU CIRMAN-ARAL ICA2–CT-2000–10039

Издано при финансовой поддержке программы
INCO-Copernicus Европейского Союза

У 67 **Управление** орошением для борьбы с процессами опустынивания в бассейне Аральского моря. Оценка и инструменты / Общ. ред. Л. С. Перейра, В. А. Духовного, М. Г. Хорста. – Ташкент: Vita Color, 2005. – 422 с.: ил.

ISBN 9965-25-744-2

Книга представляет собой сборник научно-технических статей, представляющих основные результаты совместного научно-исследовательского проекта «Управление орошением сельскохозяйственных культур с целью борьбы с антропогенным опустыниванием в бассейне Аральского моря».

УДК 681.5: 631.67+631.617
ББК 20.18

$У\frac{1502010400}{00(05)-05}$

© Agricultural Engineering Research Center,
Institute of Agronomy,
Technical University of Lisbon, 2005
© Научно-информационный центр МКВК, 2005
© Vita Color, 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

Представляемая вниманию читателя книга представляет собой сборник научно-технических статей, представляющих основные результаты совместного научно-исследовательского проекта «Управление орошением сельскохозяйственных культур с целью борьбы с антропогенным опустыниванием в бассейне Аральского моря». Проект финансируется Европейским Союзом в рамках программы INCO-Copernicus (контракт No. ICA2-CT-2000-10039).

Идея подготовки этой книги возникла в результате успешного сотрудничества ученых и специалистов Португалии, Франции, Узбекистана, Кыргызстана в этом проекте. В ходе выполнения проекта было достигнуто прекрасное взаимопонимание и взаимодействие всех участников. Различия в базовых школах партнеров были сглажены заинтересованностью в получении дополнительных знаний, совершенствовании методологии оценок, инструментария научных исследований и управления и практической деятельности. Сотрудничество было обусловлено общими интересами:

- Способствовать решению проблемы антропогенного опустынивания
- Повысить устойчивость орошаемого земледелия в Центральной Азии
- Получить новые знания и развить научные подходы, которые были бы полезны для всех организаций-участников проекта и представляемых ими стран.

Результаты имеют разнообразный характер: с одной стороны, разработка информационных технологий в области орошаемого земледелия и природных ресурсов, с другой стороны, подготовка современной основы для внедрения новых методов, технологий и моделей. Данное исследование прежде всего было ориентировано на перспективы применения, воспроизводимость полученных результатов и полезность для конечных пользователей. Представляемая читателям книга является также средством ознакомления с сутью результатов проекта всех заинтересованных в решении проблем бассейна Аральского моря, а также других регионов, сталкивающихся с проблемами дефицита воды и опустынивания. Нынешний вклад является небольшим и ограниченным по масштабам, но, несомненно, полезным для многих.

Выражаем благодарность Луису Корейра и Ванде Родригес за редактирование и подготовку заключительных форматов английской версии статей, Ойгуль Усмановой и Виктории Дашиной за перевод русских текстов на английский язык, Искандеру Беглову и Баходыру Турдыбаеву за подготовку заключительных форматов русской версии статей, Пауле Паредес и Раи-

се Кадыровой за содействие в управлении проектом в течение всех этих лет. Особая благодарность за большую поддержку и преданность делу референтам по проекту, Мишелю Дженовезе, а затем сменившему его д-ру Энрике Плаяну (EC, DG XII).

Редакторы
Л.С. Перейра, В.А. Духовный и М.Г. Хорст

FOREWORD

This book is a compilation of scientific and technical texts purposefully prepared to present the main results of the cooperative research project "Crop irrigation management for combating irrigation induced desertification in the Aral Sea Basin", funded by the European Union, INCO-Copernicus Program (Contract number: ICA2 – CT-2000 – 10039).

The idea of preparing this book results from the successful collaboration among the scientists and professionals from Portugal, France, Uzbekistan, and Kyrgyzstan throughout the project. Excellent understanding and cooperation were developed throughout the duration of the project. Differences in background schools of partners were attenuated by the interest in going further in upgrading knowledge, assessment methods, and research and management tools and practices. Collaboration was dictated by common grounds:

- contribute to solve the irrigation-induced desertification
- make irrigated agriculture in the Central Asia effectively sustainable
- develop new knowledge and scientific tools that would be useful to all participant institutions and the respective countries.

Achievements are of diverse nature: on one hand, the development of information technologies for irrigated agriculture and natural resources, on the other hand, preparation of new grounds for implementing new methods, techniques and models. The application perspective, the implementation conditions and the usefulness for the end users were always present in this research. The book is also a mean to make available the essential of project findings to all interested in the solution of the problems of the Aral Sea basin, as well as of other regions facing water scarcity and desertification problems. This contribution is small and limited in scope but is for sure useful for many.

Thanks are due to Mr. Luis Correia and Mrs. Vanda Rodrigues for revising and preparing the final formats of the English versions of the papers, to Ms. Oygul Usmanova and Mrs. Victoria Dashina for translating into English the Russian texts, to Dr. Iskander Beglov and Mr. Bakhodyr Turdybayev for preparing the final formats of the Russian versions of the papers and to Ms. Paula Paredes and Ms. Raisa Kadyrova for facilitating the project management through all these years. The great support and dedication by the technical officers in charge of the project, first Mr. Michele Genovese and later Dr. Enrique Playan (EU, DG XII) are greatly acknowledged.

The Editors
L. S. Pereira, V. A. Dukhovny and M. G. Horst

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

Часть 1 ВВЕДЕНИЕ 9

Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В ИННОВАЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОРОШАЕМОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ
Л. С. Перейра 9

Глава 2. БАССЕЙН АРАЛЬСКОГО МОРЯ – ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ
В.А. Духовный, Л.С. Перейра 22

Часть 2 ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА И ДИСТАНЦИОННЫЙ СБОР ДАННЫХ 42

Глава 3. БАЗА ЗНАНИЙ ПРОЕКТА «УПРАВЛЕНИЕ ОРОШЕНИЕМ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПРОЦЕССАМИ ОПУСТЫНИВАНИЯ В БАССЕЙНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ»
Б.К. Турдыбаев, И.Ф. Беглов, А.Г. Пулатов, Н.Д. Ананьева 42

Глава 4. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ С ЦЕЛЬЮ БОРЬБЫ С ПРОЦЕССАМИ АНТРОПОГЕННОГО ОПУСТЫНИВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ)
В.И. Соколов, А.И. Тучин 56

Глава 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОРОШЕНИЯ
А.Е. Платонов, Б. Винсент 68

Часть 3 ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОЕ ОРОШЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ВОДОЙ 86

Глава 6. СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ГРАФИКА ПОЛИВОВ: WINISAREG И GISAREG
П.С.Фортес, П.Р. Теодоро, А.А. Кампос, П.М. Матеус, Л.С. Перейра 86

Глава 7. ТЕСТИРОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ ISAREG ДЛЯ ХЛОПЧАТНИКА И ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ
Э.Д. Чолпанкулов, О.П. Инченкова, Л.С. Перейра, П. Парадес 104

Глава 8. СТРАТЕГИИ ОРОШЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ДЕФИЦИТА ВОДЫ
Э.Д. Чолпанкулов, О.П. Инченкова, П. Парадес, Л.С. Перейра 137

Глава 9. ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРОЗЕМНЫХ ПОЧВ И РАЗВИТИЯ КУЛЬТУР С ЦЕЛЬЮ КАЛИБРОВКИ МОДЕЛИ «RZWQM» ДЛЯ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ
Г.В. Стулина, М.Р. Камейра 163

Глава 10. КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ RZWQM И ПОИСК АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ОРОШЕНИЯ И ВЫРАЩИВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР
Г.В.Стулина, М.Р. Камейра, Л.С. Перейра 181

Глава 11. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛИВА ПО БОРОЗДАМ НА ЗЕМЛЯХ С БОЛЬШИМИ УКЛОНАМИ
К.М. Кулов, А.Ж. Атаканов, П.М. Жоошов, Н.Ж. Шаршекеев.....195

Глава 12. АНАЛИЗ ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛИ И ВОДЫ
С. Нерозин.....209

Глава13. ОЦЕНКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ БОРОЗДКОВОГО ПОЛИВА И ВОДОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ ХЛОПЧАТНИКА
М.Г.Хорст, Ш.Ш.Шамуталов, Д.М. Гонсалвес, Л.С.Перейра 224

Глава 14. ДИСКРЕТНЫЙ ПОЛИВ В КАЧЕСТВЕ ПРИЕМА ВОДОСБЕРЕЖЕНИЯ
М.Г. Хорст, Ш.Ш. Шамуталов, Д.М. Гонсалвес, Л.С. Перейра 249

Часть 4 ДРЕНАЖ И КОНТРОЛЬ ЗАСОЛЕНИЯ 275

Глава 15. ДРЕНАЖ И КОНТРОЛЬ ЗАСОЛЕНИЯ: ОБЗОР ПРОБЛЕМ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ
В.А. Духовный, Х. Якубов, П.Д. Умаров.....275

Глава 16. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОРОШЕНИЕМ И ДРЕНАЖЕМ
В.А. Духовный, Х.И. Якубов, П.Д. Умаров.....299

Часть 5 ИНСТРУМЕНТЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ 316

Глава 17. РАБОТА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
В.А. Духовный, А.И. Тучин 316

Глава 18. SADREG – СППР (СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ) ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ОРОШЕНИИ
Дж.М. Гонсалвес, М.Г. Хорст, Дж. Ролим, А.Муга.....337

Глава 19. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ НА ОРОШЕНИЕ
И ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ: МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ
ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ (DSS) SEDAM
Дж.М. Гонсалвес, А. Муга, П. Матеус, А.А. Кампос 373

Часть 6 БУДУЩЕЕ РАЗВИТИЕ.....401

Глава 20. БУДУЩИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОЙ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В.А. Духовный, Л. С. Перейра.....401

Часть 1

ВВЕДЕНИЕ

Глава 1.

ВВЕДЕНИЕ В ИННОВАЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОРОШАЕМОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Л. С. Перейра[1]

Реферат: После более чем четырех лет совместных исследований в рамках проекта EU-INCO CIRMAN-ARAL мы добились ряда достижений, представленных инструментами и методами управления по совершенствованию орошения в бассейне Аральского моря и странах Центральной Азии. В данной главе представлены основные инструменты и методы управления, разработанные для орошения и дренажа в регионе в свете угрозы дефицита воды, опустынивания, засоления, ограниченных экономических ресурсов, роста населения, обусловивших затруднения при переходе от централизованной к рыночной экономике. Инструменты и методы адресованы информационным технологиям, таким как системы баз знаний, системы баз данных с применением дистанционного зондирования, математические имитационные модели и системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: бассейн Аральского моря, Ферганская долина, информационные системы, модели, СППР (системы поддержки принятия решений), Орошение и дренаж, опустынивание, влияние на окружающую среду.

[1] Координатор проекта, Agricultural Engineering Research Center, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal. Email: lspereira@isa.utl.pt

Введение

Проект «Управление орошением с целью борьбы с опустыниванием в бассейне Аральского моря», финансировавшийся программой INCO Copernicus в рамках Пятой Рамочной программы Европейского Союза, был инициирован в 2001 году и завершен в 2005 году. В результате сотрудничества четырех центральноазиатских и двух европейских институтов был выполнен большой объем исследовательских работ. Это привело к ряду достижений, внесших свой вклад в устойчивость орошаемого земледелия в регионе и борьбу с опустыниванием, вызванным чрезмерным водопотреблением, накоплением солей в возвратных стоках, засолением земель и другими негативными факторами нецелесообразного использования воды.

В ходе проекта было подтверждено, что существуют такие инструменты и методы управления, которые могут остановить и обратить текущие негативные процессы, и, несомненно, содействовать новым приемам земледелия и управления водой, ведущим к устойчивым урожаям, которые, будем надеться, повысят продуктивность земли и воды и доходы фермеров, а также помогут разработать передовые методы управления водой на уровне канала и на верхнем уровне водной иерархии.

Проект показал, что сочетая существующие знания соответствующим образом с новыми передовыми знаниями, возможно создание новых инструментов, вводя в практику информационные технологии эпохи информации и коммуникации на основе совместимых и логически связных научных и технологических знаний, как это продемонстрировано на примере центральноазиатских научно-исследовательских организаций. Хотя и политические и экономические изменения существенно повлияли на их научно-исследовательский потенциал, но потенциал знаний продолжает оставаться прочной базой для будущего развития и, в частности, для претворения в жизнь результатов исследований и инструментов, созданных в рамках данного проекта. Это наглядно показано в данном сборнике, где в части 2 продемонстрирован особый подход к решению задач будущего развития.

Цели исследования

Орошение в бассейне Аральского моря имело довольно противоречивые эффекты. С одной стороны, оно обеспечило условия для выращивания продовольственных сельхозкультур и хлопкового волокна, тем самым обеспечив занятость и доходы сельского населения, а также городского населения, занятого в агропромышленности и в текстильной промышленности. С другой стороны, орошение привело к значительному сокращению стока в реках, впадающих в Аральское море, накоплению солей на некоторых возделываемых землях, где не был осуществлен эффективный дренаж, и повышению минерализации воды в реках, выполняющих роль собирателей дренажных вод. Другими словами, ирригация преуспела в обеспечении условий для развития в полуаридных зонах Центральной Азии, но ее отри-

цательное воздействие на окружающую среду ведет к физическому опустыниванию, т. е. в перспективе к постоянной диспропорции в водообеспеченности вследствие отбора воды и ухудшения ее качества в сочетании с деградацией почв, в основном вследствие засоления, с уменьшением емкости экосистем и деградации Аральского моря (рис. 1), прежде большого пресноводного озера, а сейчас засоленного и усыхающего.

Национальными и международными организациями было предпринято множество действий, направленных на борьбу с данным антропогенным опустыниванием и улучшение экономических, социальных и экологических условий в этом регионе. Основные действия в сельском хозяйстве фокусировались на дренаже и контроле засоления, а также на эксплуатации и управлении крупными оросительными системами. Данный проект был сосредоточен на совершенствовании орошения на уровне хозяйств, поскольку эффективность полевого дренажа, объем дренажного стока и количество солей, поступающих в воду низовьев зависят от того, как управляют оросительной водой на уровне хозяйств, а совершенствование управлением водой в системах транспортировки и распределения воды и сокращение изъятия водных ресурсов для целей орошения, весьма зависят от спроса хозяйств на воду. Одновременно, проект также включал исследования по дренажу и контролю засоления и вопросам графиков и способов водоподачи с целью увязки спроса хозяйств и режимов орошения.

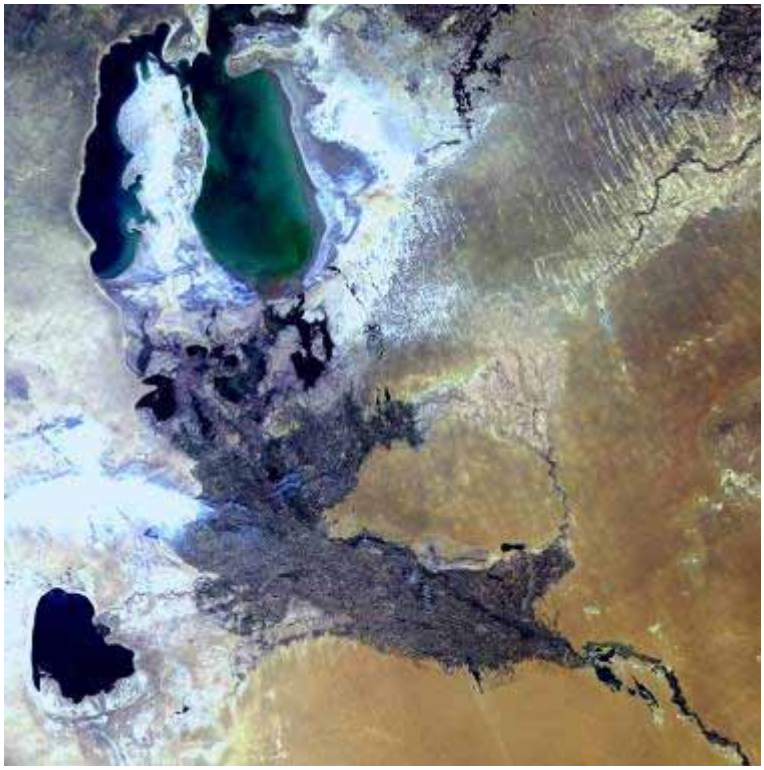


Рис. 1. Аральское море к началу 2003 г.

Совершенствование управления орошением сельскохозяйственных культур представляет возможность снизить требования на орошение, уменьшить долю воды, пополняющую минерализованные грунтовые воды, повысить эффективность регулирования солей в корнеобитаемой зоне и повысить урожайность на единицу затраченной воды. Таким образом, усовершенствованное управление орошением сельхозкультур будет способствовать борьбе с опустыниванием и достижению устойчивости орошаемого земледелия в этом, испытывающем дефицит воды регионе. В частности, оно обеспечивает инструменты и методы, необходимые для внедрения в практику орошаемого земледелия новых элементов Интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР), особенно на уровне Ассоциаций водопользователей (АВП), являющихся в данный момент основной тенденцией в регионе (см. главы 2 и 20).

В данном проекте основной упор сделан на Ферганскую долину, располагающуюся в верхней части бассейна реки Сырдарья, и входящие в сферу интересов различные районы Узбекистана, Кыргызстана и Таджикистана (рис. 2).

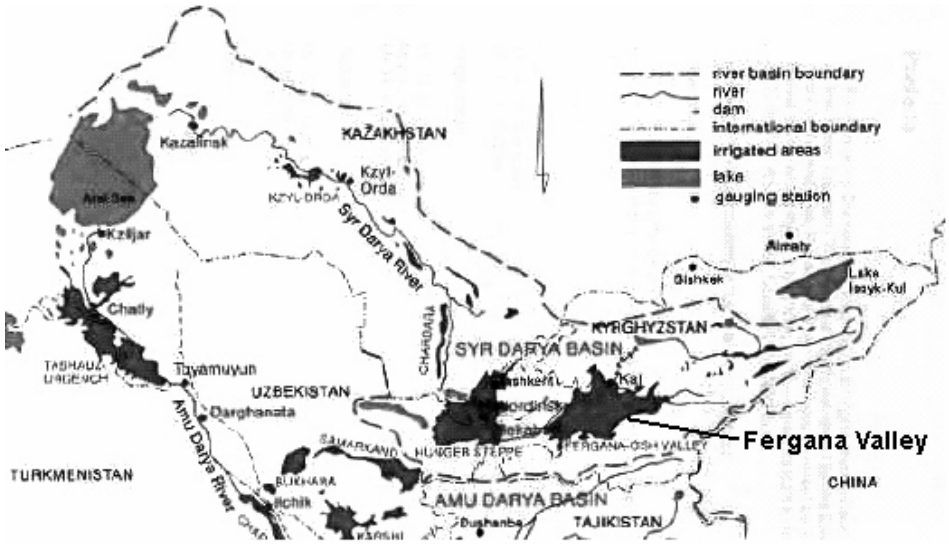


Рис. 2. Бассейн Аральского моря и Ферганская долина в верхнем течении р. Сырдарьи

Конкретными научно-техническими целями проекта были следующие:

- Разработать надлежащие инструменты для выбора наиболее подходящих стратегий уменьшения требований на орошение основных сельскохозяйственных культур региона, а именно применение, после их проверки в полевых условиях, имитационных моделей «сельхозкультура-вода»
- Оценить технические, экологические и экономические характеристики методов орошения полей и разработать управленческие и технические

решения, ведущие к минимизации непродуктивных потерь оросительной воды на фильтрацию и поверхностный сброс

- Оценить работу дренажа, как средства контроля засоления в орошаемом земледелии, включая разработку методологии комплексной оценки дренажа и орошения и методов повышения качества почв и воды
- Определить основные механизмы взаимодействия между хозяйством и системами водоподачи, которые могут привести к сокращению как системных, так и внутрихозяйственных требований на воду, а также затрат и потерь воды
- Разработать базу знаний, базу данных и географические информационные системы, поддерживающие инструменты исследований и дальнейшее внедрение результатов проекта
- Разработать комплексные средства поддержки принятия решений, включающие проверенные имитационные и аналитические модели, которые могут помочь управляющим системы, специалистам, консультирующим фермеров и лицам, принимающим решения непосредственно в хозяйствах, в выборе наиболее подходящих для борьбы с опустыниванием стратегий орошения, т.е. тех, которые ведут к экономии воды, контролю засоления и увеличению доходов фермеров
- Внести вклад в виде научной базы в другие региональные проекты по охране окружающей среды и развитию, включая распространение знаний по рациональному водопользованию, водосбережению и контролю засоления.

Информационные системы

Большое количество информации фактически по всем вопросам, относящимся к управлению водой и водопользованию, орошаемому земледелию и опустыниванию уже собрано в центральноазиатских странах. Таким образом, создание базы знаний, отражающей исследования, выполненные в Центральной Азии по тематике данного проекта в прошлом, а именно по орошению, дренажу, засолению, опустыниванию и последствиям, вызванным орошением, должно стать весьма полезной для ученых, экспертов, экологов, лиц, разрабатывающих политику, и общества в целом. База знаний, доступ к которой обеспечивается через специальный раздел на веб-сайте НИЦ МКВК, подробно описывается в главе 3.

Главным направлением деятельности было принятие информационных технологий (ИТ) для подготовки и развития баз данных, необходимых при выполнении проекта и для целей моделирования. Основное внимание уделялось развитию инструментов ГИС для использования пространственных, географически привязанных данных в моделировании и изучения возможностей методов дистанционного зондирования (ДЗ) как для обеспечения дальнейшей поддержки управления, так и для создания и обновления соответствующих пространственно распределенных данных, используемых

в моделях, оперирующих инструментами ГИС. Таким образом, чтобы обеспечить поддержку внедрения ИУВР в Ферганской долине в рамках проекта была разработана информационная система/база данных, включающая ГИС. Она представляет важнейшее достижение для дальнейшего внедрения результатов проекта и описана в главе 4.

Соответствующие базы данных могут обновляться с помощью данных дистанционного зондирования (см. главу 5) и предусматривают использование в дальнейшем моделей, апробированных в ходе проекта.

Дистанционное зондирование

Были выполнены следующие разработки в развитие методов дистанционного зондирования (глава 5):

- Классификация землепользования с использованием мульти-временных (декадных) NDVI* профилей спутниковой съемки SPOT Vegetation
- Анализ декадных значений NDVI, по данным SPOT Vegetation для различных площадных единиц (орошаемые зоны, административные районы, коллективные хозяйства) с 1999 по 2002 гг.
- Классификация основных сельскохозяйственных культур (хлопчатник, озимая пшеница, кукуруза) на основе средних значений NDVI для каждого участка, рассматриваемой площади из двух снимков Landsat-7 ETM + космической съемки 2001 г.
- Выявление засоления почв через анализ неоднородности значений NDVI с помощью специально разработанного индекса неоднородности
- Оценка на основе значений NDVI по декадным периодам коэффициентов сельхозкультуры (Kc) для озимой пшеницы.

Два аспекта, требующие особого внимания: выявление площадей, подвергшихся засолению и получение коэффициентов сельскохозяйственных культур. По сути, известные на данный момент методы определения засоления с помощью ДЗ не совсем подходят для Ферганской долины, поскольку в данном регионе нет обширных засоленных площадей. Поэтому была разработана новая методология, которая дала многообещающие результаты, но, чтобы она стала работоспособной, необходимы дальнейшие исследования. Что касается получения коэффициентов сельхозкультур (K_c) из ДЗ, совместное использование спутниковых снимков SPOT Vegetation и Landsat-7 ETM позволило адаптировать существующую методологию выведения коэффициентов культур из линейной регрессии NDVI при принятии методологии ФАО-56. Стало возможным оценить декадные значения K_c хлопчатника и озимой пшеницы, результаты этой оценки согласуются со значениями из литературных источников и с экспериментами (глава 7). Данные K_c, полученные с помощью ДЗ, могут быть реализованы в базе данных ГИС, используемой в GISAREG.

* Индекс нормализованного различия растительности

Результаты ДЗ легко объединяются с ранее упомянутой базой данной с привязкой к географическим координатам Ферганского региона, что говорит о больших возможностях применения ДЗ в управлении орошением.

Требования на орошение и режим орошения. Имитационные модели «сельхозкультура-вода»

Работы относятся к некоторым аспектам внедрения усовершенствованных технологий по: а) требованиям культур на воду и требованиям на орошение, подтвержденным и соотнесенным с методиками, принятыми в регионе; б) тестированию и параметризации моделей расчета режимов орошения и управления водой; в) установке имитационных моделей.

Первый подход заключался в адаптации современного руководства ФАО-56 (1998) по расчету эталонной эвапотранспирации ЕТо с использованием метода Пенмана-Монтейта и подхода к расчету коэффициентов сельхозкультур. В связи с этим, для нескольких метеостанций выполнено сопоставление данных ET_o и E_{pan}[**] (глава 7).

Модель WINISAREG была успешно принята для целей расчета требований культур на воду и полив и расчета режимов орошения. Модель описана в главе 6. Она дает хорошие возможности для обоснований режимов орошения и, главным образом, для моделирования разнообразных вариантов при выборе норм и сроков полива, моделирования дефицитного орошения, учета ограничений на водообеспеченность и оценки подпитки со стороны грунтовых вод и фильтрации. Полевые эксперименты по режимам орошения и проверке адекватности объектам имитационных моделей режимов орошения были организованы в хозяйствах Ферганской (Узбекистан), Ошской (Кыргызстан) и Согдийской (Таджикистан) областей, как описано в главе 7. Помимо упомянутых экспериментов в Ферганской долине, калибровка и обоснование модели выполнялись с использованием материалов полевых исследований периода 1982-1987 гг. на хлопковых полях Голодной степи, включавших данные по почвенной влаге и ЕТ, причем последние были получены с помощью метода теплового баланса (глава 7). Тестирование модели было успешным и таким образом можно считать, что модель установлена и готова к постепенному ее внедрению в практику орошаемого земледелия. Результаты позволили назначить в исследуемых регионах коэффициенты сельхозкультур (Kc) и дострессовые доли истощения почвенной влаги (p) для хлопчатника и озимой пшеницы, а также разработать альтернативные режимы орошения хлопчатника и озимой пшеницы в Ферганской долине при полном и дефицитном орошении в условиях максимального использования осадков и ограничения глубинной фильтрации за пределы корнеобитаемой зоны (глава 7).

Модель исследовалась на разнообразных стратегиях орошения, нацеленных на экономию воды и ограничение глубинной фильтрации, а также,

---

[**] E_{pan} - испарение из эвапориметра класса ГГИ-3000 [мм/сут]

как подробно проанализировано в главе 8, на ограничение влияния засоления на орошаемые почвы, включая применение режима дефицитного орошения с оценкой соответствующего влияния его на урожайность. Работа модели WINISAREG при практическом планировании была протестирована в нескольких хозяйствах (глава 8). Модель запускается до посадки сельхозкультур и спроектированный график поливов предлагается фермеру; затем для совершенствования оценок в течение вегетационного периода модель запускается с интервалами примерно в один месяц с обновленными данными по климатическим факторам и по поливам. Однако, фермеры имеют склонность к водоподаче, превышающей предлагаемые «нормы», и зачастую проводят больше поливов, чем запланировано. Поэтому необходимо обучение фермеров и распространение практических знаний.

Параллельно разработке версии WINISAREG модели ISAREG, была создана модель GISAREG, которая объединяет ISAREG с ГИС ArcView 3.2, как это описано в главе 6. Большим преимуществом GISAREG является использование пространственно распределенных данных из созданных баз данных ГИС (глава 4), включая использование полученных с помощью методов дистанционного зондирования коэффициентов сельхозкультур (глава 5), соответственно обновляемых, после полной апробации и подтверждения работоспособности соответствующей методологии, в режиме реального времени.

Модель свойств воды в корнеобитаемой зоне (RZWQM) была откалибрована и использовалась в качестве средства управления развитием сельхозкультур. Калибровка выполнялась на засеянном кукурузой экспериментальном поле, расположенном в хозяйстве «Азизбек-1» (Ферганская область Узбекистана), на сероземных почвах. Гидравлические характеристики почвы были определены на основе натурного эксперимента с монолитом и параллельно лабораторными методами, тем самым, были усовершенствованы соответствующие методологии. Для получения химических характеристик почвы и параметризации химических компонентов модели RZWQM были выполнены пространственная съемка и лабораторный анализ. Наблюдения велись за почвенной влажностью, потенциалом почвенной влаги и развитием растений (глава 9). К сожалению, химические характеристики почвы не позволили опробовать модель на предмет засоления, но поскольку модель работоспособна, эту возможность можно исследовать в будущем.

После калибровки модель RZWQM использовалась как инструмент управления при прогнозировании влияния разных методов полива и внесения удобрений на урожайность культур (глава 10). В отношении внесения азота результаты показывают, что кукуруза не реагирует на внесение N более 200 кг/га, что можно рассматривать как верхний предел усваивания удобрений. В отношении полива результаты показывают, что фактические режимы орошения приводят к 10 % снижению урожайности. RZWQM может быть использована для моделирования различных сценариев ведения сельского хозяйства, для дальнейшего агро-экономического анализа и оценок с пози-

ций продуктивности воды и экономической прибыли. Параллельно моделированию, в разных пространственно-временных масштабах региона выполнялись исследования продуктивности земли и воды (глава 12).

Внутрихозяйственные системы орошения: усовершенствованные методы и моделирование

Деятельность осуществлялась в следующих направлениях: (а) усовершенствование системы полива по бороздам; (б) установка имитационной модели SIRMOD на основе набора соответствующих полевых данных и анализа для ее параметризации и последующего применения; (в) создание базы данных, необходимой для СППР (система поддержки принятия решений) модели SADREG.

Основные полевые исследования проводились в хозяйстве «Азизбек-I» в центральной части Ферганской долины. На первом этапе оценивалось несколько вариантов полива по бороздам, с сопоставлением поливов через борозду с поливами в каждую борозду, длин борозд, расходов водоподачи, условий инфильтрации, зависящих от степени уплотнения борозд, и уклонов, как это описано в главе 13. Остальные исследования описаны в главе 11. Была усовершенствована методология, используемая для оценки полива по бороздам, а измерения условий спланированности земель, расходов в борозды, поперечных сечений борозд, продолжительности добега и спада поливных струй, гидравлической шероховатости и инфильтрации позволили сделать точную параметризацию имитационной модели SIRMOD. Были рассмотрены выборки показателей эксплуатационных характеристик полива.

Наилучшие эксплуатационные характеристики полива по длинным бороздам наблюдались при поливе через борозду, который обладает хорошими возможностями экономии воды по сравнению с поливом в каждую борозду. Эффективность полива может существенно повыситься, когда время отключения соответствующих расходов водоподачи устанавливается по дефициту почвенной влажности к моменту полива, с избежанием тем самым переполива, который практикуется в настоящее время (глава 13).

На втором этапе, сравнивалась техника дискретной и непрерывной водоподачи в каждую борозду и через борозду. Позднее, полевые исследования позволили сравнить поливы хлопчатника по продуктивности использования воды (WP) и эксплуатационным характеристикам использования воды (глава 14). При применении дискретной водоподачи через борозду в пределах поливного периода хлопчатника была достигнута значительная от 200 до 390 мм экономия воды (глава 14). Дискретный полив продемонстрировал возможность сокращения, как глубинной фильтрации за пределы корнеобитаемой зоны, так и концевого поверхностного сброса. Преимущества дискретного полива особенно очевидны на поливах в начале оросительного сезона.

Дискретная водоподача через борозду показала себя наилучшей техникой водосбережения и повышения продуктивности использования воды. При сопоставлении с традиционной непрерывной водоподачей в каждую борозду, затраты воды были уменьшены на 3890 $м^3$/га (44%) при снижении урожайности на 380 кг/га (11%), в тоже время как продуктивность воды составила 0,61 кг/$м^3$ против 0,38 кг/$м^3$ при традиционном поливе. Кроме того, доля полезно потребленной воды, от использованной на уровне поля - 0,85, была достаточно высокой (глава 14).

Дренаж и контроль засоления

В главе 15 приведен хороший обзор дренажа и контроля засоления в Центральной Азии. Полевые испытания были организованы в хозяйстве «Азизбек-I» в сочетании с упомянутыми экспериментальными поливами. Особое внимание было уделено напорным водам, являющимся характерными для региона и составляющими немаловажный элемент водно-солевого баланса.

Для определения эффекта закрытого дренажа в водном балансе, замерялись весь объем отводимой закрытым дренажом воды, а также концентрация солей в ней. Было установлено, что водно-солевые процессы в хозяйстве относительно «прихода»-«расхода» солей стабилизировались с почти «нулевым» балансом (главы 15 и 16). Тем не менее, от участка к участку водно-солевые балансы разнятся. Собранные данные показывают, что на засоленных землях даже в хорошо дренируемых зонах с постоянно работающим дренажом во избежание повторного засоления необходимо обеспечивать промывной режим орошения.

Среднегодовой дренажный модуль был по наблюдениям в 2-2,5 раза ниже, чем при строительстве дренажа, т. е. в период 1962-1964 гг. Расход дрен изменяется в широком диапазоне, с максимумом в вегетационный период в результате поливов и минимумом в осенне-зимний период. Вклад напорных вод составляет около 100 мм/год.

Минерализация грунтовых вод по сравнению с первоначальной 5,8-10 г/л стабилизировалась на уровне 3,0-3,8 г/л по токсичным солям и на уровне 0,06-0,1 г/л по содержанию хлора. Общая минерализация незначительно изменяется в течение года. Благодаря промывке и невысокой минерализации оросительных и грунтовых вод, процессы повторного засоления в корневой зоне не наблюдаются (глава 16).

Инструменты поддержки принятия решений

Основным итогом данного проекта являлась разработка инструментов поддержки принятия решений в помощь лицам, принимающим решения, и другим специалистам при выборе способа управления орошением и приемов, повышающих экономию воды и улучшающих экологические и социально-экономические последствия орошения.

Один из инструментов поддержки принятия решений моделирует функционирование систем транспортировки и распределения воды с применением алгоритма оптимизации для совершенствования обеспечения требований на воду хозяйства или поля. Он был протестирован на оросительной сети второго порядка системы Ферганского канала и сопоставлен с текущей ситуацией (глава 17). Эта модель водоподачи и водораспределения удовлетворительно реагирует на ситуации путем сокращения объема подаваемой воды, улучшения графика водоподачи, ограничения эксплуатационных потерь воды и повышения стабильности и равномерности водоподачи.

Программное обеспечение по СППР SADREG представляет собой средство проектирования поверхностного полива, связанное с базой данных ГИС. Оно объединяет в себе наборы данных, расчетные и имитационные модели, многофакторный анализ и знания пользователя. Оно позволяет в соответствии с критериями, устанавливаемыми пользователем создавать и ранжировать альтернативные сценарии внутрихозяйственного совершенствования. База данных содержит информацию о размерах и топографии полей, интенсивности впитывания и влагоемкости почвы, сельхозкультурах, управлении орошением (посредством интерактивного моделирования с помощью модели WINISAREG) и экономические данные. Модели поверхностного полива включают модуль планировки поверхности земли и имитационную модель SIRMOD, которая может применяться при расчетах полива по бороздам, чекам и полосам. Внутрихозяйственные системы орошения по бороздам адресованы к непрерывной и дискретно регулируемой водоподаче, с использованием облицованных оросителей или земляных русел, жестких или гибких поливных трубопроводов с регулируемыми водвыпусками и управляемых вручную или автоматически клапанов-переключателей потока. Применяя разработанный много лет назад в Ферганской долине прием многоярусного полива и повторного использования поверхностного стока, пользователь может рассмотреть вариант разбивки поля по его длине на ярусы. Оценочный анализ включает расчеты затрат и прибылей и определение характеристик, относящихся к экологическим и экономическим воздействиям. Приоритеты, используемые при ранжировании сценариев, определяются пользователем. Модель описана в главе 18, где анализируются основные результаты ее использования.

SADREG позволяет рационально создавать, оценивать и ранжировать проектные альтернативы. При этом проектные альтернативы легко увязываются с характеристиками технического, экономического и экологического характера, что обеспечивает соответствующий диалог между проектировщиком и пользователем, и для ранжирования с помощью многофакторного анализа и оценки весомости критериев, задаваемых проектировщиком и пользователями, и, в конечном итоге, обеспечивает лучшее соответствие целям, поставленным лицами, принимающими решения.

Модель СППР SEDAM имеет два основных компонента: внутрихозяйственное орошение и систему каналов-распределителей. Она моделирует спрос на воду и водоподачу на уровне сектора (площадь, обслуживаемая отводом из магистрального канала и связанными с ним каналами-

распределителями) и агрегирует результаты на уровне района. Она работает с базой данных ГИС в сочетании с моделью расчета режимов орошения GISAREG и моделью СППР хозяйства SADREG. На основе действий по управлению системой, относящихся к водоподаче и внутрихозяйственной ирригационной системе, модель продуцирует сценарии. Каждый сценарий представляет комплекс мероприятий, соответствующих стратегии совершенствования, запланированной на уровне сектора, и относится к внутрихозяйственному уровню – режим орошения, планировка земель, водораспределение в хозяйстве, регулирование расхода водоподачи – и к уровню системы водоподачи, например, расход водоподачи выше по течению, правила и сроки водоподачи. В модели водоподачи из сети каналов-распределителей используется упрощенный объемный баланс, а расчеты включают оценку фильтрации и сброса из каналов, а также определение времени, требуемого для достижения потоком установившегося режима течения. Поля группируются пользователем и в соответствии со структурой посевов сельхозкультур принимается схема водооборота. Модель SEDAM включает модуль многофакторного анализа для формулирования и оценки альтернатив в свете выбранных пользователем эксплуатационных, экономических и экологических критериев (глава 19).

Результаты применения SEDAM показывают, что имеется большой потенциал решения существующих проблем чрезмерного использования воды, когда улучшения в управлении системой водораспределения увязываются с усовершенствованиями орошения на уровне хозяйств для ограничений сбросов и потерь на фильтрацию и для приведения водоподачи в соответствие с режимами поливов в хозяйствах. Модель SEDAM предполагает возможность стать ценным инструментом для поддержки принятия решений, как по внутрихозяйственным, так и по распределительным оросительным системам. Однако для этого требуется соответствующая база данных и параметризация используемых моделей. Интеграция с ГИС расширяет возможности модели в смысле доступа к входным пространственно распределенным данным и создает удобный для пользователя интерфейс, как для запуска модели, так и для просмотра результатов. Дальнейшее усовершенствование модели включают ее увязку с моделью гидравлического моделирования и планирования водоподачи, упомянутой в главе 17.

Внедрение технологий

Внедрение результатов CIRMAN-ARAL, включая испытания на полях усовершенствованных режимов орошения, методов полива и дренирования, нововведение в практическую деятельность инструментов поддержки принятия решений и обучение менеджеров/специалистов консультационных служб и фермеров, предусматриваемые НИЦ МКВК, планируется организовать соответственно таблице 1.

Основная цель заключается в претворении в жизнь новых совершенных технологий, а именно – инструментов поддержки принятия решений в

Ассоциациях водопользователей (АВП) и Водохозяйственных организациях (ВХО), а также в других проектах, выполняемых в регионе, например в выполняющийся ныне совместно с IWMI проект в Ферганской долине и тех или иных проектах, поддерживаемых различными донорами. Предусматриваемая деятельность, как обрисовано в главе 20, может оказать существенное влияние на дальнейшее развитие интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР).

Таблица 1. План внедрения технологий и основные мероприятия, предусматривыемые НИЦ МКВК

Мероприятия	Заказчики	Пользов атели	Стоимость (1000 €)	Сроки выполнения
Разработка на основе WINISAREG и SADREG серии динамичных оросительных норм для центральноазиатских государств	Министерства водного хозяйства (водного и сельского хозяйства) пяти государств	ВХО, АВП, фермеры	130	2005 - 2007
Передача моделей для АВП и консультационных служб				
a) для пилотного проекта ИУВР Фергана	Областные сельхоз-ные организации	АВП, фермеры	120	2005 - 2007
b) для других зон			1420	2006 - 2010
Достижение стабильной водоподачи и сведение к минимуму эксплуатационных потерь воды путем совершенствования и внедрения моделей Gams / SEDAM				
a) совершенствование и стыковка моделей	Министерства водного хозяйства пяти государств	ВХО, АВП	460	2005 - 2006
b) система применения				2006 - 2007
c) тренинг пользователей				2006 - 2007
Усовершенствование метода расчета дренажа с учетом орошения разнородных земель		ВХО, АВП и другие	130	2005 - 2007

Некоторые из ожидаемых результатов данных совместных технических нововведений и сведение в единое целое технических и управленческих аспектов ИУВР могут привести к:

- передаче в АВП и соответствующим консультантам по ирригации моделей и инструментов (WINISAREG, SIRMOD, DSS SADREG и других) по использованию воды на уровне поля и орошению с ориентацией на изменение принятых оросительных норм при их адаптации к климатиче-

ским колебаниям, местным почвенным условиям и практике возделывания сельскохозяйственных культур

- сведению к минимуму эксплуатационных потерь воды в системах водоподачи и водораспределения в результате принятия подхода «снизу-вверх» и использования усовершенствованного инструментария. Совместное использование моделей Gams (глава 17) и DSS SEDAM (глава 19) должно развиться в операционный пакет, однако для этого потребуются дальнейшее совершенствование этих моделей
- повышению продуктивности земли и воды через надлежащую агротехнику, уточненные режимы орошения, своевременную подачу воды на поля и высокие равномерность и эксплуатационные качества оросительных систем.

Глава 2.

БАССЕЙН АРАЛЬСКОГО МОРЯ – ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

В.А. Духовный[2], Л.С. Перейра[3]

Реферат: Бассейн Аральского моря на протяжении всей своей истории был пионером развития водного хозяйства и продолжает быть предметом дискуссий и многочисленных исследований. Ныне на переломном этапе своего развития орошаемое земледелие здесь претерпевает бурную динамику, резко отличающуюся в различных странах и зонах в зависимости от политических и природных условий. Анализ нынешней ситуации подводит к выработке путей выживания при нарастании водного дефицита, концентрирующихся в виде интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР), которое должно получить научное обоснование, что и планировалось в рамках данного проекта, финансировавшегося Европейским Союзом (ЕС).

Ключевые слова: Устойчивое развитие; гидроэкология; водосбережение; экономия воды; водное хозяйство; орошение.

[2] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, г. Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11. Факс (998 71) 166 50 97; dukh@icwc-aral.uz

[3] 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

Введение

Водное хозяйство и орошаемое земледелие Аральского бассейна претерпевает достаточно сложный период политического возрождения и экономической трансформации в условиях независимости, перехода к рыночной экономике, усиленного воздействиями интернационализации и глобализации и выработки новых форм развития государств. В аридной зоне эти две отрасли имеют огромное социально-экономическое и экологическое значение с учетом демографической ситуации, решающей роли водного фактора и трансграничных отношений. Хотя в регионе всегда велось множество научных и исследовательских работ, однако комплексные исследования, которые обосновали бы научные пути рационального использования водных ресурсов в орошении, являющегося основным (80 %) потребителем воды в регионе, только разворачиваются.

Работы данного совместного научно-исследовательского проекта ЕС должны стать одним из первых шагов в этом направлении, ибо дают возможность должным образом учесть на основе современных методов моделирования процессов водопотребления, водоподачи, водораспределения, а также формирования продуктивности воды и земли. Данные методы включают применение географической информационной системы (ГИС) вместе с технологиями дистанционных измерений (ДИ) и системы поддержки принятия решений (СППР). Они позволяют рассмотреть как природные и технические ресурсы и системы определяют потребность в воде и использование воды с учетом распределения во времени и пространстве.

Данная книга представляет результаты проекта «INCO Copernicus ICA 2 CT 2000» и обобщает результаты работ в этом направлении, тем самым формируя основу будущего плана сочетания водопользования в интересах природы и общества с развитием водного и сельского хозяйства. Цель статьи – показать те рамки возможных ресурсов воды, в которых регион развивался и будет развиваться в ближайшие 25-50 лет и каковы прогнозы в этой области. Данная статья основана на различных работах, упомянутых в библиографии к статье, а также на многочисленных научно-технических материалах, полученных и собранных в Научно-информационном центре Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии (НИЦ МКВК), особо в рамках проектов WARMIS и CAREWIB.

Прошлое водного хозяйства и орошаемого земледелия Аральского бассейна

Один из семи центров древней цивилизации находился и развивался в Центральной Азии (рис. 1), по времени своего зарождения совпадая с аналогичными в Египте, Месопотамии, Индии, Китае (III-II тысячелетия до нашей эры).

Пройдя этапы ручьевого, кяризного*, бесплотинного, оазисного орошения к XIX веку, водное хозяйство и ирригация получили новый толчок инженерного процесса благодаря приходу русской инженерной мысли, а именно Костякову А.Н., Массальскому В.В., Ризенкампфу Г.К., работавшим в регионе в то время. Именно этому периоду принадлежат первые крупномасштабные проекты в регионе – Голодностепский, схема будущего Каракумского канала, Чу-Таласа, низовьев Амударьи и т.д. В советский период к этому добавились схемы комплекса гидроэнергетического развития, постепенно получившие своё воплощение в 1925-1990 гг.

Рис. 1. Страны Центральной Азии и бассейн Аральского моря
(источник: GRID-Arendal)

В результате в регионе появился огромный технико-экономический водохозяйственный комплекс орошения, гидроэнергетики, водоснабжения, но в то же время Аральское море, ранее являющееся четвертым по объему в мире бессточным водоемом, по сути, исчезло как единое водное тело с поверхности земли (рис. 2).

Это заставляет пересмотреть прошлые варианты развития и найти новые подходы, увязывающие водохозяйственное развитие с окружающей средой и поддержанием важнейших экосистем. Цифры, отражающие динамику водного хозяйства (таблица 1), говорят о нарастании крупных социально-экономических проблем, которые усиливают имеющиеся природоохранные и экологические проблемы. Поэтому требуются новые и имею-

* кяриз – водоприемная фильтрационная галерея

щие менее технический характер подходы для устойчивого использования водных и природных ресурсов в регионе.

Июль-сентябрь 1989 Август 2003

Рис. 2. Аральское море, уже не представляющее единое водное тело

В целом к 1990 г. сложившееся в регионе водное хозяйство и орошение представляло из себя сочетание совершенных современных сооружений, уникальных насосных станций и каналов (Каршинский, Каракумский каналы, Джизакский каскад насосных станций), плотин, оросительных систем с передовой техникой дренирования и орошения, комплексной системой управления (Голодная, Каршинская, Кызылкумская степи) (рис. 3) и отсталых, требующих реконструкции систем на площади почти половины орошаемых земель с крайне неупорядоченной системой водоподачи и водораспределения.

Это противоречащее сочетание хороших и плохих, современных и старых, усовершенствованных и устаревших систем определяло ирригационную и водохозяйственную ситуацию, когда страны бассейна Аральского моря стали новыми независимыми государствами. «Плюсы» и «минусы» этого огромного сектора экономики и природопользования, дававшего до 40 % всего ВНП региона, мы можем увидеть в порожденных ими силе и слабости последовавшего этапа развития (таблица 2).

Таблица 1. Динамика воды с 1960 года

Показатель	**Ед. изм.**	**1940**	**1960**	**1970**	**1980**	**1990**	**2000**	**2004**
Население	млн. чел.	10,6	14,6	20,3	26,8	33,6	41,8	43,8
Орошаемая площадь	тыс. га	3,8	4510	5150	6920	7600	7896	8120
Суммарный водозабор	км^3/год	52,3	60,61	94,56	120,69	116,27	105,0	102,0
в т.ч. на орошение	км^3/год	48,6	56,15	86,84	106,79	106,4	94,6	93,0
Удельный водозабор на 1 га орошения	м^3/га	12800	12450	16860	15430	14000	11850	11450
Удельный водозабор на душу населения	м^3 на чел. в год	5000	4270	4730	4500	3460	2530	2120
ВВП	млрд. долл. США	12,2	16,1	32,4	48,1	74,0	27,5	34,4

Рис. 3. Оросительный канал в Голодной степи

Таблица 2. Наследие Советской эпохи

Позитивные аспекты	Негативные аспекты
• Огромная водохозяйственная инфраструктура • Жесткое управление и планирование водного хозяйства • Высокий уровень технических знаний • Тесное сотрудничество водников разных республик • Создание Бассейновых водохозяйственных объединений (БВО)	• Пренебрежение общественным мнением и участием • Недостаточное внимание экологическим требованиям • Административно-командная система • Неспособность принять рыночный механизм • Отсутствие платного водопользования

Мощная инфраструктура, управлявшаяся командным методом на всех уровнях иерархии сверху вниз, с определенным ущемлением одних водопользователей и приоритетами других, но соответствующей компенсацией на межреспубликанском уровне, с огромными затратами на эксплуатацию, поддержание и развитие оказалась совершенно неприспособленной к децентрализованному управлению, требуемому в условиях рынка, где межсекторная конкуренция, многоуровневые отношения и эгоистичные устремления различных водопользователей и водохозяйственных органов порождают совершенно отличную эксплуатационную и управленческую среду. С учетом слабой экономической базы в переходный период и в настоящее время, прежняя система водного хозяйства оказалась в положении «колосса на глиняных ногах», который долгое время не может прийти в себя. Появление в регионе международной экспертизы и концентрация внимания на экологических и экономических промахах прошлой системы, наряду с этим незначительные объемы реальной донорской помощи и противоречивость рекомендаций по переходным процессам не способствовали формированию нового стабильного управления водой в условиях независимости. Кажущееся снижение водозаборов и водопотребления в переходный период связано с соответствующим уменьшением суммарного валового продукта в целом по региону и с этих позиций не может свидетельствовать о повышении эффективности общего использования водных ресурсов в бассейне.

Определенное значение в снижении продуктивности сельского хозяйства в последние 5 лет имело снижение цен на сельхозпродукцию, в то же время по отдельным странам региона складывается совершенно различно. Согласно показателям, прослеживается явно положительная тенденция в водном хозяйстве Казахстана и Кыргызстана. Все экономические показатели Туркменистана явно выделяются, так же как и Казахстана.

Особенно хотелось отметить влияние введения платы за воду в Казахстане и Кыргызстане, поскольку эти меры уже оказали заметное влияние на использование оросительной воды: объемы водозабора и водопотребления

в этих странах значительно сократилось (рис. 4). Теперь Ассоциации водопользователей (АВП) должны взять на свои плечи все работы по подаче и распределению воды, а также содержанию оросительной сети в пределах границ бывших колхозов и совхозов.

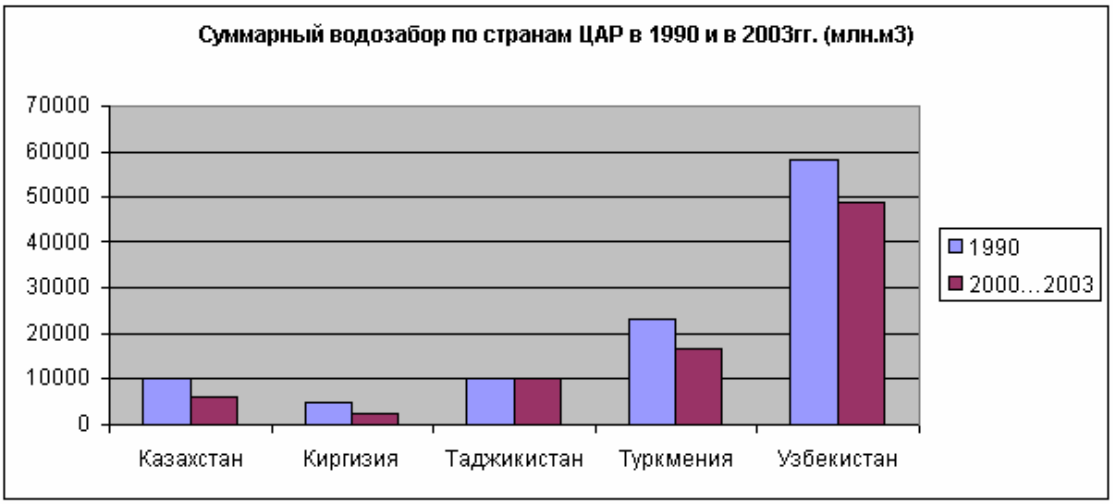


Рис. 4. Суммарный водозабор по странам ЦА в 1990 и в 2003 г.

Дифференциация тенденций развития в переходный период в странах Центральной Азии вызвала различие в современном состоянии водного хозяйства и орошаемого земледелия в различных странах региона.

Одновременно, имеются и многие общие характеристики:

- Приватизация и реструктуризация водного хозяйства охватила все страны региона в различных формах с размером орошаемых хозяйств от 0,2–1 га в Киргизии до 5–100 га и даже более в Казахстане
- Сохранение в ряде стран кооперативных и общественных хозяйств (Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан)
- Повсеместно (кроме Туркменистана) создание АВП
- Признание ИУВР как общего инструмента и средства повышения эффективности водопользования
- Недостаточное внимание к дренажу и отсюда ухудшение его состояния, выход из строя, увеличение степени засоления земель, падение урожайности и продуктивности земель
- Очень незначительные капвложения в совершенствование техники полива и восстановление и поддержание оросительных систем.

Основные отличия в водохозяйственной политике центральноазиатских стран состоят в следующем:

- Разные подходы в соотношении «руководство – управление», проявляющиеся в различных аспектах, но больше всего в распределении дохо-

дов от сельского хозяйства между фермерами и бюджетом, что в сочетании с дотациями в сельское хозяйство, определяет эффективность и заинтересованность фермеров, платежеспособность их и АВП, возможность вкладывать деньги в улучшение земли (наилучшая ситуация в Казахстане и Кыргызстане)

- Степень участия государства в реконструкции и развитии оросительных и дренажных систем, в поддержании АВП (уровни этой поддержки отличаются в Кыргызстане, Казахстане, Туркменистане)
- Изменение отношения к технологиям водосбережения и экономии воды и их стимулирование
- Вовлечение общественности, развитие потенциала и организация обучения фермеров и работников АВП и водохозяйственных организаций (ВХО).

Очень важно стремление самих водохозяйственных организаций проявить внимание к анализу водопользования. Если ранее на протяжении 50-60 лет советской эпохи жесткая система управления водой отвечала перед крупными хозяйствами (совхозами и колхозами) за четкость и гарантированность водоподачи, то ныне размельченные тысячи ферм оказались в конце огромной лестницы иерархии, по которой спускаются водохозяйственные решения, проходя все ступени «бассейн – суббассейн (национальный) – система – канал – АВП – фермер» (рис. 5).

Действительно это длинный путь, где конечный пользователь помещен в конце цепи многоступенчатых интересов, капризов, и эгоизма. А ведь урожай зависит от точности водоподачи (в нужное время и в нужном количестве), от метода и качества подачи. Поэтому водохозяйственные и местные органы должны понимать потребности фермера в перспективе, который оказался ныне крайним, зависящим от отдельных ограничивающих факторов.

Принято считать, что водопользователи удовлетворены водоподачей, если обеспечена ее стабильность и своевременность, а также равномерность распределения воды между поливами. С другой стороны, водохозяйственная организация работает удовлетворительно, если количество воды, забранное из источника, не превышает суммарное испарение всех сельхозкультур более, чем на 20 %.

Оценка существующего положения в водообеспеченности и водоподачи была выполнена с использованием данных, собранных НИЦ МКВК. В таблице 3 приведены коэффициенты водообеспеченности (КВО) по разных иерархическим ступеням вододеления, а на рис. 6 показаны примеры данных по водообеспеченности вдоль нескольких основных каналов в период вегетации.

В особенности имеют место ситуации, когда водоподача во многом превышает эвапотранспирацию, тем самым демонстрируя низкую степень управляемости водой, которая допускает как перебор, так и дефицит воды, что и в первом и во втором случае приводит к потере урожая.

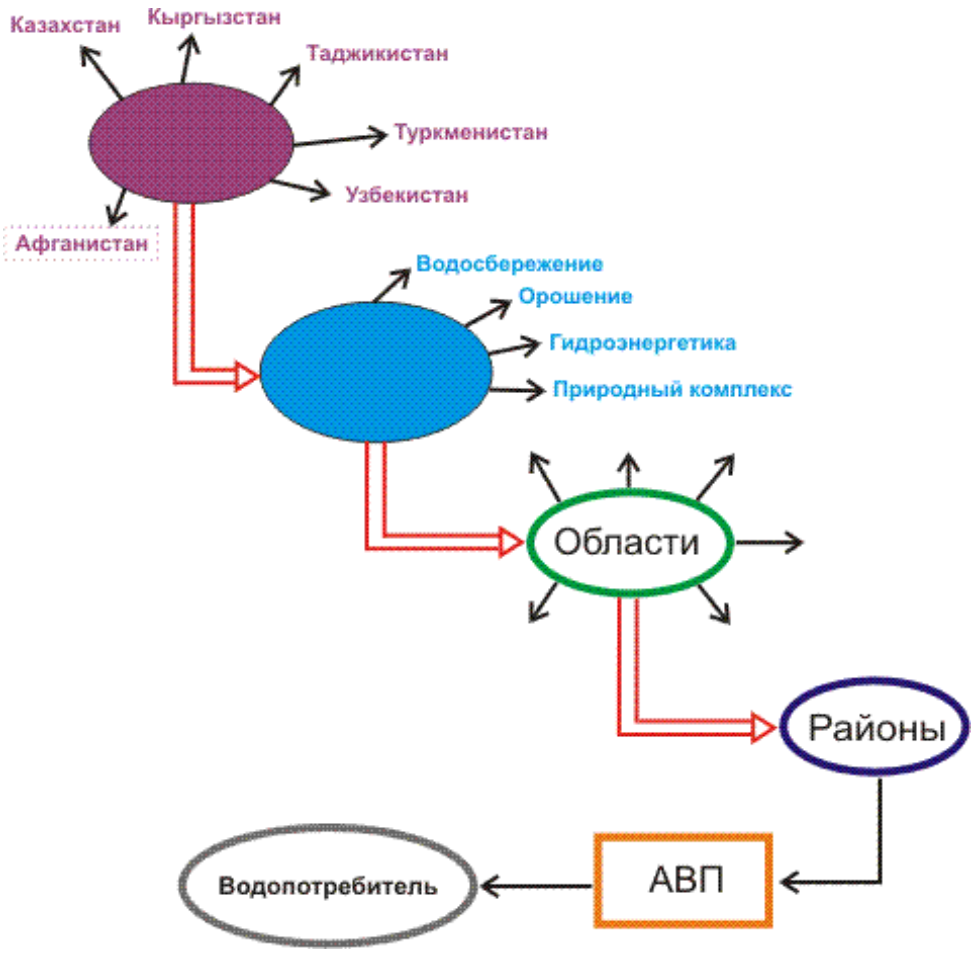
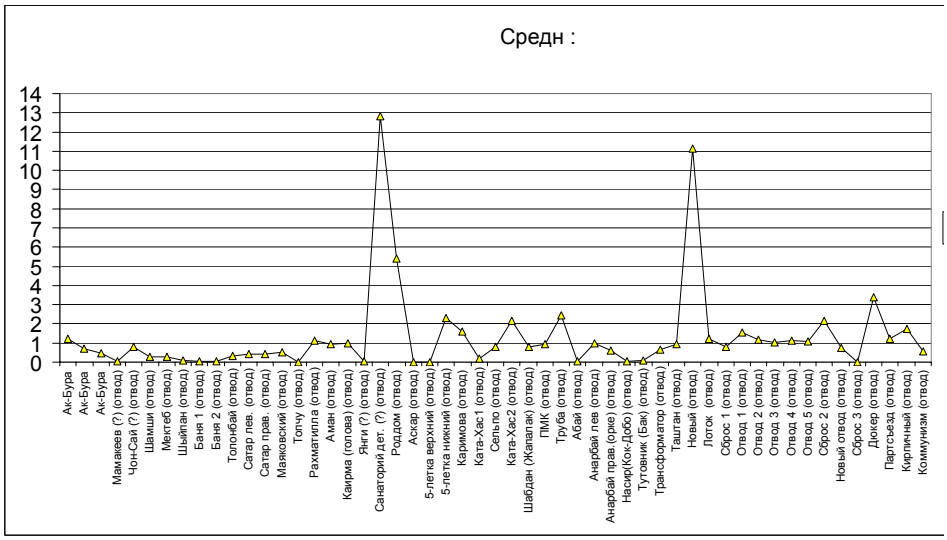


Рис. 5. От национальной политики до решений водопользователей

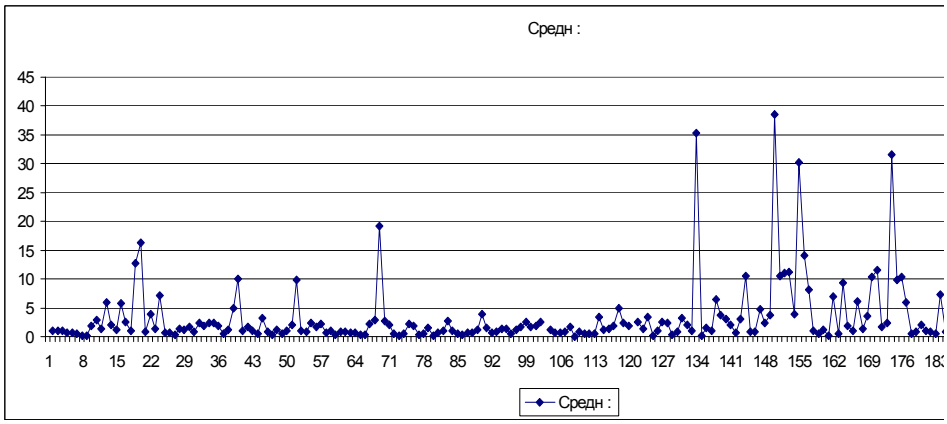
Таблица 3. Динамика коэффициента водообеспеченности по ступеням иерархии водораспределения по данным 2000 г.

Республика	**Область**	**Коэфф. на уровне водозабора области**	**То же на уровне выдела в хозяйства**	**Район**	**По водозабору в район**	**На уровне выдела в хозяйства**	**Хозяйства**	**На уровне хозяйства**	**На уровне поля**
Кыргызстан	Баткентская	2,00	1,62	Кадамджайский	1,79	1,39	Ак-Суу-Халмитон	1,19	0,92
	Жалалабадская	1,46	1,17	Базар-Коргонский	1,67	1,3	Текдик	2,26	1,76
				Ноокенский	1,44	1,25	Таймонку	1,27	1,1
							Арал-сай	1,35	1,17
	Ошская	1,28	1,02	Аравансайский	1,08	0,84	АВП "Ак-Буура"	0,96	0,75
Таджикистан	Согдийская	2,75	2,28	Дж.Расуловский	1,76	1,43	Б.Хамдамова	0,95	0,77
					2,65	2,2	Саматова	1,1	0,89
				Б.Гофуровский			Бахростан	2,09	1,69
Узбекистан	Андижанская	1,43	1,06	Баликчинский	1,34	0,98	Узбекистан	0,89	0,65
					1,11	0,86	"Сиза"	1,20	0,88
				Избаскентский			Узбекистан	1,33	1,03
	Наманганская	1,18	1,01	Папский	1,51	1,30	Пап	0,77	0,66
				Мингбулакский			Гигант	1,13	0,96
					1,28	1,09	Навои	0,88	0,75
	Ферганская	1,24	1,03	Ташлакский	1,61	1,30	Навои	1,56	1,26
				Ахунбабаевский	1,75	1,40	Ниязов	1,10	0,88
				Кувинский	1,37	1,15	Навои	1,06	0,89
Среднее	по Кыргызстану	1,58	1,27		1,56	1,25		1,42	1,115
	по Таджикистану	2,75	2,28		1,705	1,315		1,38	1,117
	по Узбекистану	1,29	1,03		1,423	1,01		1,01	0,896



а)

б)



в)

Рис. 6. Средние значения и динамика водообеспеченности
за период вегетации (2003) по каналам:
а) «Араван-Акбура»; б) «Ходжа-Бакирган» в) ЮФК

Основные причины такого состояния:

- Устаревшие нормы водопотребления, рассчитанные на определенные показатели среднего года, средних для данного гидромодульного района почвенных и гидрогеологических условий, не отражающие реальную потребность растений в воде
- Проблемы управления водой относительно реальных требований на воду
- Отсутствие динамичных планов водопользования, ориентированных на конкретные условия того или иного года, учитывая, что существующие планы рассчитаны на средний год, средний состав культур и средние условия почв; это характерно и для верхних и для нижних уровней управленческой иерархии. Водопотребление маловодного года отличается от среднемноголетнего, так же как и среднемноголетнего от многоводного на 1200-2000 $м^3$/га
- Завышенные потребности в воде и завышенные лимиты, особо в верхних и средних течениях, приводят к недодаче воды в нижних течениях и особо к недоучету экологических требований природы (дельты, самих рек и т. д.)
- Отсутствие системы распределения воды в АВП и единых критериев на водопользование среди водопользователей
- Неспособность ВХО контролировать распределение воды между водовыделами и обеспечивать справедливую урезку воды в условиях дефицита
- Неучет дифференцированных условий водоподачи в масштабах планирования водопользования
- Неумение сотрудников водного хозяйства использовать механизмы эффективного участия в водоподаче и водопотреблении на уровне фермер – группа пользователей – АВП и далее АВП – канал
- Невнимание работников ВХО к базовым правилам водоподачи по распределителям второго порядка
- Отсутствие материальной заинтересованности, которая может заставить фермеров экономить и рационально использовать воду
- Недостаточное внимание к механизму поддержания систем и их реконструкции
- Недоучет возможности использования воды из других источников (возвратных, подземных и т.д.).

Большая часть этих недостатков может быть решена путем повсеместного внедрения принципов интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР) в регионе.

Что же ждет регион в будущем и каковы перспективы?

Еще в период до независимости центральноазиатские страны осознали, что Аральский бассейн подошел к исчерпанию водных ресурсов и к не-

обходимости планов по коренной перестройке водного хозяйства региона и к поиску дополнительных источников воды.

Спад экономики в результате распада Советского Союза и переход новых независимых государств к рынку дал определенную «поблажку» государствам и водохозяйственным органам в остроте решения этого вопроса, однако постепенное восстановление промышленных и сельскохозяйственных мощностей, а также создание и развитие новых отраслей начинают создавать условия, которые в ближайшем будущем приведут к постепенному решению данных проблем. К этому нужно добавить, что само общество изменилось – в целом общественность постепенно требует усиления восприятия природных ресурсов и спроса и потребления воды с позиций охраны природы. Да и ряд выполняемых проектов, особо в Казахстане (восстановление Северного моря, проект дельты Сырдарьи) и Узбекистане (проекты Глобального Экологического Фонда (ГЭФ) – Судочье, НАТО - Система водоемов в Южном Приаралье) предъявляет жесткие требования к экологическим попускам в довольно значительных размерах – дельта Амударьи – 8,5-10 км^3 в год; дельта Сырдарьи – 4,5-5,5 км^3 в год (В.А. Духовный и др., 2003 г.).

Перспектива использования водных ресурсов нашла отражение в нескольких документах и работах: ЮНЕСКО (1999-2000), ГЭФ (1998-2001), НИЦ МКВК (2002 а, б). Последняя оценка перспективы была сделана в рамках исследования процессов глобального потепления, выполненного НИЦ МКВК (2002-2003). Ниже приводятся последние результаты прогнозов, полученные из анализа трех сценариев развития до 2020г.: «продолжение существующих тенденций» (бизнес как обычно), «средний» или «нейтральный» сценарий и «оптимистический» сценарий. Краткое описание сценариев приводится далее.

а) «Оптимистический» сценарий

- До 2020 года регион будет развиваться на основе улучшения тех интеграционных процессов, которые сегодня намечаются правительствами всех центральноазиатских стран
- Взаимовыгодное совместное использование всех трансграничных водных ресурсов на основе водосбережения и единых природоохранных подходов
- Взаимовыгодное развитие аграрного сектора с максимальным акцентом на региональное разделение производства особо по наиболее выгодной специализации культур
- Согласованная переработка в аграрном секторе и его инфраструктуре
- Достижение потенциальной продуктивности воды и земли
- Темпы роста населения уменьшаются и снизятся к 2020 г. до 0,98 % в год
- Среднегодовой рост ВНП в период от 2000-2010 гг. будет – 8-10 % в год, с 2010 до 2015 г. около 10-12 % в год, с 2015 до 2020 г. не менее 7 % в год

- Энергетика будет развиваться преобладающим образом на базе гидростанций и их совместного строительства с упором на обеспечении устойчивого производства экологически чистой энергии;
- Предполагается, что вследствие проводимой политики водосбережения на уровне государств водопотребление на орошение будет снижено до 9400 $м^3$/га, а водопотребление для населения также будет ограничено
- Производство продовольствия составит в среднем 3500 ккал/чел/день при превалировании в рационе овощей и фруктов
- Значительный рост ВНП будет обеспечен за счет опережающих темпов роста промышленности.

б) «Нейтральный» сценарий

- Интеграционные процессы в области управления трансграничными водными ресурсами будут развиваться более медленными темпами, чем в «оптимистическом» сценарии
- Отсутствие региональной специализации сельскохозяйственных культур и согласованной переработки в аграрном секторе
- Темпы роста населения снизятся незначительно, достигая к 2010 г. – 1,44 % в год и к 2020 г. – 1,23 % в год;
- Темп роста ВНП будет составлять 2-4 % в год;
- Освоение новых земель ограничивается не только наличием водных ресурсов и их качеством, но и отсутствием необходимых инвестиций;
- Учитывая, что в данном сценарии предполагается незначительное развитие экономики и ограниченные финансовые ресурсы для внедрения водосбережения во всех отраслях экономики, водопотребление на орошение составит 11000 $м^3$/га, а водопотребление для населения будет выше, чем в «оптимистичном» сценарии.

в) Сценарий сохранения существующих тенденций

- Развитие региона будет осуществляться при сохранении существующих тенденций в использовании трансграничных водных ресурсов, а также в области развития региональной интеграции аграрного сектора, как по производству сельскохозяйственной продукции, так и по ее переработке. Основные усилия государств будут направлены на водосбережение местных водных источников
- При сохранении национальных трендов развития проявляется рост диспаритета в доходах и в организационных элементах государств региона и как следствие в различном экономическом развитии среди упомянутых государств
- Темпы роста населения – 1,9 % в год
- Темп среднегодового роста ВНП по бассейну - 6-8 % в год

- В соответствии со сложившимися тенденциями водопотребление на орошение составит 12000 м^3/га, а водопотребление для населения останется относительно высоким
- Площадь орошаемых земель до 2020 г. практически остается неизменной.

На основании этих трех вариантов развития, в двух подвариантах с учетом возможного изменения климата, можно сделать вывод, что к 2020 г., регион сможет обеспечить себя собственными продуктами питания и будет обладать определенным потенциалом экспорта сельскохозяйственной продукции и в некоторых вариантах развития образуется определенный резерв водных ресурсов.

Тогда как, если мы ничего не будем предпринимать, и развитие будет в рамках существующих тенденций, то не может быть и речи о предоставлении на нужды природы дополнительных объемов воды.

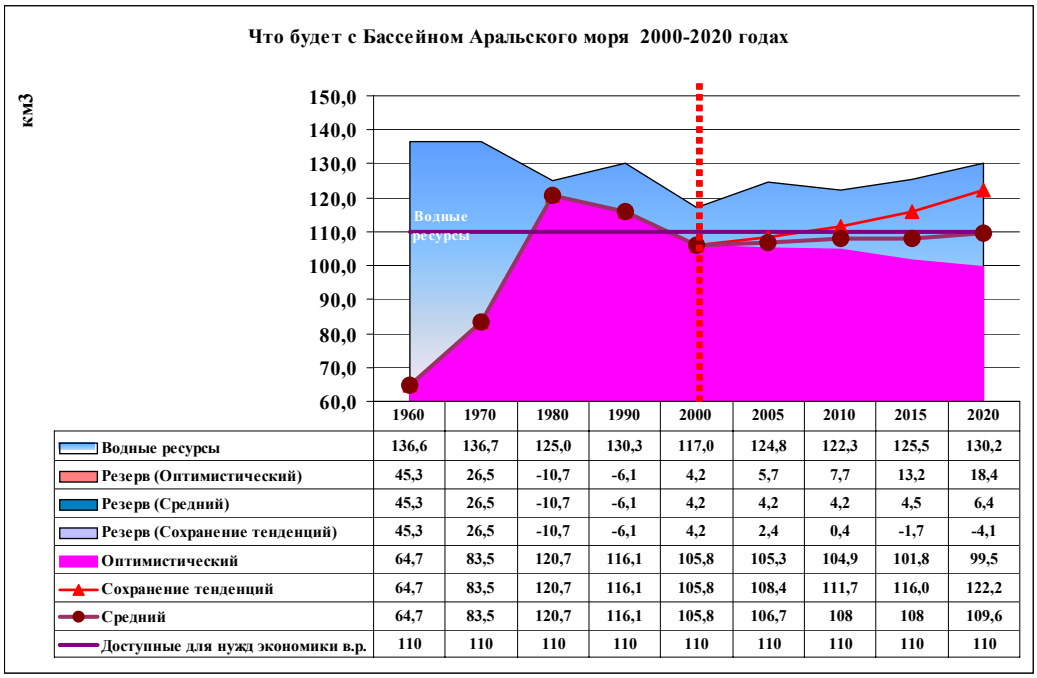
По «оптимистическому» сценарию к 2015 году *обеспечение* продуктами питания населения в регионе превысит *спрос* на 7 %, а резерв водных ресурсов составит 13,2 км^3 в год, к 2020 году эти показатели соответственно будут составлять 18 % и 18,4 км^3. Но и по «среднему» сценарию мы получаем резерв 6,4 км^3, хотя с меньшей продуктивностью воды и земли.

Результаты данного моделирования (рис. 7 и таблица 4) показывают, что регион сможет выжить на существующих ресурсах воды лишь в условиях перехода на стратегию оптимального развития, которая базируется на следующих допущениях:

- равноправное и справедливое использование совместных трансграничных водных ресурсов всеми странами
- приближение всех водопользователей к потенциальной продуктивности по воде и земле (Нерозин, 2005)
- всесторонний переход к принципам ИУВР.

Таблица 4. Динамика водопотребления и водообеспеченности (км^3) по сценариям развития

Сценарии	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2015	2020
Общий объем водных ресурсов	136,6	136,7	125,0	130,3	117,0	124,8	122,3	125,5	130,2
«Сохранение тенденций»	64,7	83,5	120,7	116,1	104,6	106,2	106,7	107,4	108,4
«Нейтральный»	64,7	83,5	120,7	116,1	104,6	104,6	104,6	104,6	104,6
«Оптимистичный»	64,7	83,5	120,7	116,1	104,6	103,2	101,4	96,1	91,1



	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2015	2020
Водные ресурсы	136,6	136,7	125,0	130,3	117,0	124,8	122,3	125,5	130,2
Резерв (Оптимистический)	45,3	26,5	-10,7	-6,1	4,2	5,7	7,7	13,2	18,4
Резерв (Средний)	45,3	26,5	-10,7	-6,1	4,2	4,2	4,2	4,5	6,4
Резерв (Сохранение тенденций)	45,3	26,5	-10,7	-6,1	4,2	2,4	0,4	-1,7	-4,1
Оптимистический	64,7	83,5	120,7	116,1	105,8	105,3	104,9	101,8	99,5
Сохранение тенденций	64,7	83,5	120,7	116,1	105,8	108,4	111,7	116,0	122,2
Средний	64,7	83,5	120,7	116,1	105,8	106,7	108	108	109,6
Доступные для нужд экономики в.р.	110	110	110	110	110	110	110	110	110

Рис. 7. Что будет с бассейном Аральскогог моря в 2000-2020 гг.

Интегрированное управление водными ресурсами

ИУВР представляет систему управления (в отличие от предложения Глобального Водного Партнерства (ГВП) считать его процессом), которая базируется на взаимодействии всех возможных ресурсов вод (осадки, поверхностный сток, подземные и возвратные воды) и связанных с ними земельных и других ресурсов в пределах гидрографических границ. Данная система предназначена для увязки различных секторов водо- и природопользования, иерархических уровней водоподачи и водопотребления, а также для вовлечения всех водопользователей в процессы решения, планирования, финансовой поддержки для обеспечения реальных требований общества и природы на устойчивой основе.

Система ИУВР обеспечивает стабильную основу для совместной организации, которая объединяет всех заинтересованных субъектов и объекты, нацеленных на выполнение определенных задач, включающих формирование и развитие упреждающих механизмов, учитывающих динамические изменения в потреблении и развитии водных ресурсов процессов влияния, особо процессы организационного самосовершенствования и развития. В то время как процессы самосовершенствования и саморазвития сами адаптируются к изменению окружающих природных условий, первоначальные цели и принципы, определенные с самого начала формирования организационной основы останутся неизменными.

ИУВР призвано интегрировать:

- планирование и управление всеми водными ресурсами и требованиями на них, независимо от секторов водопользования и источников ресурсов
- количество и качество воды

- распределение воды в верховьях и низовьях
- все заинтересованные субъекты, включая водопользователей, АВП, ВХО, природопользователей, местных органов, НПО и других лиц, принимающих решения и разрабатывающих политику; их потенциаьные трудовые и организационные ресурсы и интересы*
- все уровни водной иерархии, регулирующей спрос и подачу воды «снизу доверху»
- управление водой и землей, особо в области орошения и дренажа
- интересы общества (экономики) и природы (окружающая среда)
- расходы, затраты и выгоды как на уровне пользователей и управляющих водой, так и на уровне государства и общества в целом.

На основе этих положений рассматривается следующий критерий ИУВР: достижение оптимальной продуктивности водопользования в зависимости от социально-экономических и природных ограничений и с учетом воздействия деятельности человека в пределах гидрографических границ (и вне их). Это определение включает прямые и косвенные затраты, доходы и последствия.

Данный подход позволяет разработать схему взаимодействия уровней иерархии управления, исходя из организационной основы (рис. 8), которая четко выдерживает вертикали и горизонтали иерархии по направлениям управления:

- общественное руководство с участием всех заинтересованных субъектов (например, общественный Совет бассейна, ВХО, АВП);
- исполнительные органы (например, управление системой, каналом, дирекция АВП и ВХО).

* Для трансграничных водных источников очень важна интеграция интересов бассейна и стран.

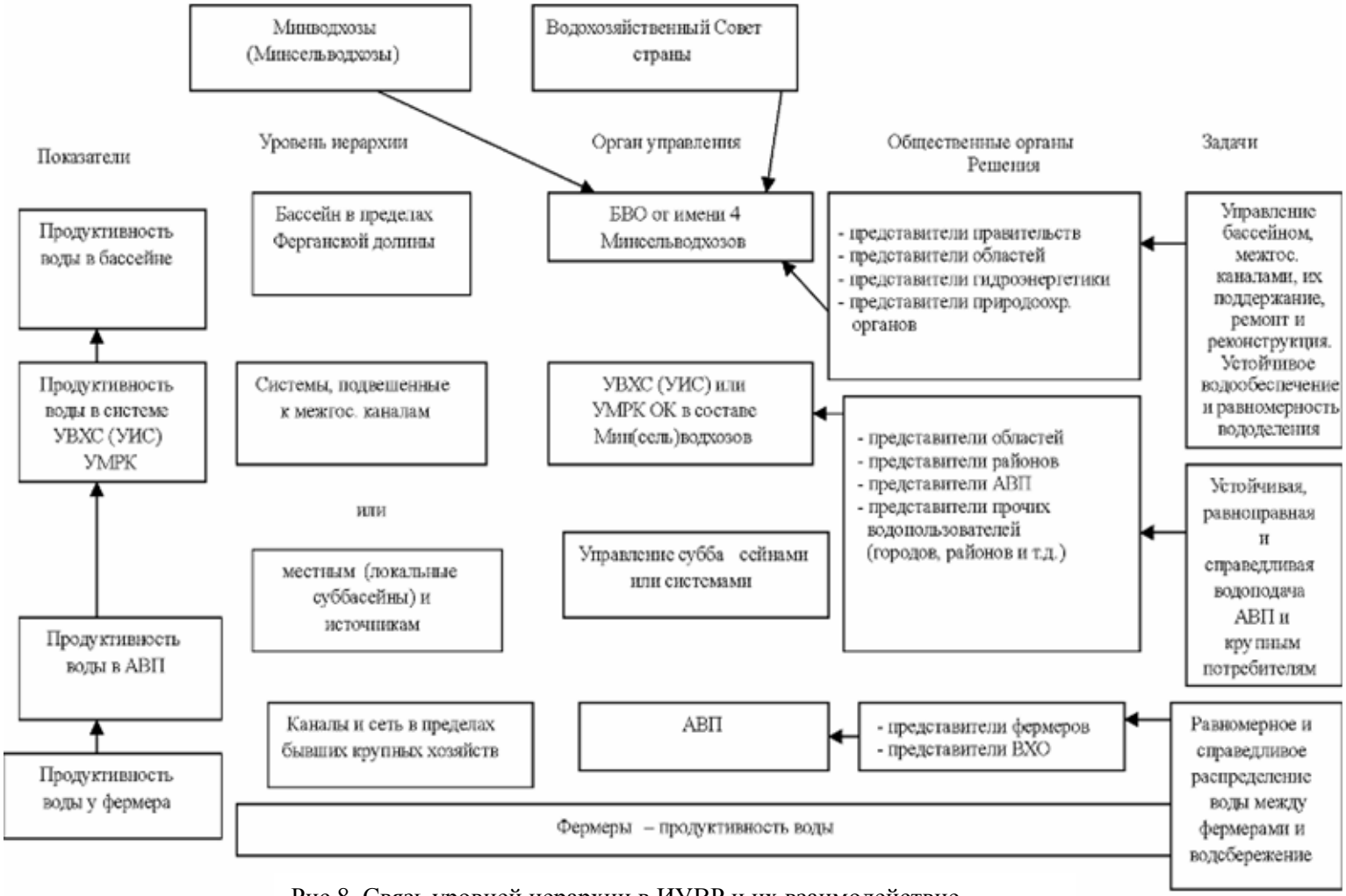


Рис.8. Связь уровней иерархии в ИУВР и их взаимодействие

Увязка по вертикали идет через:

- Коллективное членство представителей нижнего уровня иерархии в руководящих общественных органах более высокого уровня
- Поток вкладов и платежей за водопользование и услуги водоснабжения и за воду как ресурс, а также за мелиоративное обслуживание, в технической увязке по линии базы данных, информационной системы и системы моделей, касающихся воды и земли, орошения и дренажа.

С целью обеспечения необходимой научной поддержки для внедрения принципов ИУВР, НИЦ МКВК разрабатывает средства для применения данного комплекса инструментов управления, в частности на основе технологий ГИС и ДИ, как описано в данной книге, что позволяет численно увязать различные техническо-экономические параметры водо- и землепользования и сопутствующие оцениваемые ресурсы. Модели, описанные в других главах книги, позволяют уточнить обеспеченность и потребности в ресурсах и выявить наилучшие пути обеспечения общих требований водопользователей – стабильности и равномерности водоснабжения.

Наряду с вышеупомянутым, для улучшения управления водой необходимы некоторые ключевые инструменты для продвижения принципов регулирования, основанных на новых технологиях, организационном развитии и нацеленных на обеспечение материальной и финансовой поддержки всем участникам. Эти вопросы пока не доработаны окончательно. Модели, рассмотренные в данном проекте, составляют только часть общей научной и модельной базы знаний ИУВР, которая, будем надеяться, получит дальнейшее развитие и поддержку.

Выводы

Перспектива предвидимого будущего развития бассейна Аральского моря дает основание допустить, что регион сможет выжить, с позиции водообеспеченности, до конца третьей декады нынешнего тысячелетия - даже при существующей устаревшей конструкции оросительной и дренажной сети – но при условии, что непродуктивные потери воды будут сведены к минимуму при достижении стабильности и устойчивости водообеспечения. Это требует привлечения современной системы ИУВР, основанной на четком понимании взаимоотношения всех элементов иерархии управления водой. Предложенные в проекте инструменты и модели, описанные в нескольких работах данной книги, являются лишь началом научного обоснования этой системы.

Благодарность

Авторы выражают признательность Р.И. Кадыровой, И.Р. Журавлевой, И.Ф. Беглову, В.Г. Приходько и Д.А. Сорокину за помощь в подборе материалов к статье и ее оформлении. Глубокая признательность г-ну М. Женовезе за постоянную поддержку и внимание.

Библиография

Духовный В.А., Ирригационные комплексы на новых землях Средней Азии, Ташкент, 1983. - 184 стр.

Духовный В.А., Мелиорация и водное хозяйство засушливой зоны, Ташкент: Мехнат, 1993.

Духовный В.А., де Шуттер Ю., Сорокин А.Г., Рузиев И., Приходько В., Модель бассейна Аральского моря, отчет, НИЦ МКВК, Ташкент, 2002, 212 стр.

Духовный В.А., Сорокин А.Г., Тучин А.И., 2003, Экологическое состояние низовьев рек Амударьи и Сырдарьи и необходимость попусков по ним, НИЦ МКВК, Ташкент, 56 стр.

Нерозин С.А., 2005. Анализ продуктивности воды и земли (в настоящем сборнике).

НИЦ МКВК, 2002б. Проект «Интегрированное управление водными ресурсами Ферганской долины», Вступительный отчет IWMI, НИЦ МКВК, Ташкент, 66 стр.

НИЦ МКВК, 2002а. Диалог о воде и климате: исследование. Ташкент, 166 с.

Clausen T.J., 2002, IWRM, Toolbox. Manuscript rep., Global Water Partnership, 56 p.

UNESCO, 1999–2000, Water Vision Environment Management Project, Aral Sea Basin, Haskoning, Scientific report, Vol. 5, Paris.

Часть 2

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА И ДИСТАНЦИОННЫЙ СБОР ДАННЫХ

Глава 3.

БАЗА ЗНАНИЙ ПРОЕКТА «УПРАВЛЕНИЕ ОРОШЕНИЕМ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПРОЦЕССАМИ ОПУСТЫНИВАНИЯ В БАССЕЙНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ»

Б.К. Турдыбаев,[4] И.Ф. Беглов[4], А.Г. Пулатов[4], Н.Д. Ананьева[5]

Реферат: В результате сбора и обработки материалов по 281 исследовательским проектам, осуществленным в странах центральноазиатского региона, создана база знаний проекта CIRMAN-ARAL. Эта база предназначена для эффективного использования имеющейся информации, тем самым обеспечивая достижение рационального водопользования, нацеленного на устойчивое развитие производства продовольствия в регионе без нанесения ущерба природе. База знаний также включает информационные материалы по современным методам повышения эффективности водопользования в сельском хозяйстве – как на уровне поля, так и ирригационной системы и включает модели и соответствующие руководства, разработанные для настоящего проекта.

Ключевые слова: база знаний, рубрикатор ГРНТИ, орошение и дренаж, опустынивание, влияние на окружающую среду.

Введение

В настоящее время в странах Центральной Азии накоплено большое количество информации практически по любым вопросам, касающимся

[4] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, 700187, г. Ташкент, м-в Карасу 4, дом 11, bakh@icwc-aral.uz.
[5] Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), Узбекистан, 700187, г. Ташкент, массив Карасу 4, дом 11.

водного хозяйства и использования вод, в частности, в орошаемом земледелии. Однако использование этих материалов в достаточной степени затруднено из-за их бессистемности, разбросанности, сложности использования и неприспособленности к использованию компьютерной техникой. При этом нужно иметь в виду, что практики, а также лица принимающие решения, не имеют такой возможности как исследователи подробно и детально изучать накопленные наукой и практикой результаты и им нужно преподнести информацию в таком виде, чтобы ее использование было удобно и понятно для всех. Основная идея создания базы знаний состоит в том, чтобы взять опыт человека-эксперта в области мелиорации и водного хозяйства и, по возможности, с минимальными добавлениями, перенести его на более формальный язык программирования (или специальный язык представления знаний).

Одной из таких попыток является деятельность программы International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID), направленная на разработку информационного ресурса в интернете (WCA-InfoNET), который даст прямой доступ к широкому диапазону знаний в области мелиорации и водного хозяйства. Созданная база знаний проекта CIRMAN-ARAL «Управление орошением сельскохозяйственных культур с целью борьбы с антропогенным опустыниванием в бассейне Аральского моря», отражающая многолетний опыт специалистов Центральной Азии, тематически во многом совпадает с WCA-InfoNET.

Выполненные в рамках проекта CIRMAN-ARAL сбор, обработка и распространение информации о выполненных в центральноазиатском регионе исследованиях, являются информационной поддержкой основной цели проекта – созданию практических рекомендаций, направленных на борьбу с опустыниванием, а также способствующих смягчению влияния засухи и устойчивому развитию сельского хозяйства за счет эффективного водопользования в орошаемом земледелии.

Цели

Целью рабочего пакета 1 (РП-1) проекта CIRMAN-ARAL являлось создание базы знаний о прошлых исследованиях выполненных в центральноазиатском регионе по основным темам проекта: опустынивание и влияние орошения.

Созданная база знаний состоит из следующих компонентов:

- **тематического дерева базы знаний** созданного на основе разработанного нами рубрикатора по использованию земельных и водных ресурсов;
- **набора систематизированных факторов и следствий**, связанных с основными понятиями по темам «Опустынивание и его мониторинг», «Влияние орошения на различные виды вод», «Способы орошения»;
- **толкового (терминологического) словаря**, в качестве вспомогательной информационной структуры, в которой даются определения для используемых понятий;

- **библиографического указателя** книг и статей, а также рефератов, касающихся каждого из указанных определений и явлений;
- **перечня проектов**, выполненных в данной области знаний и их описание.

Методы

Нами использовался следующий метод поэтапного построения базы знаний.

1. Идентификация проблемы (знакомство и обучение коллектива разработчиков, а также создание неформальной формулировки проблемы). Уточнение задачи, планирование хода разработки прототипа базы знаний, с определением необходимых ресурсов (время, люди, компьютеры и т. д.); источники знаний (книги, дополнительные эксперты, методики); имеющиеся аналогичные информационные системы, классификаторы; цели (распространение опыта, автоматизация рутинных действий и др.).

2. Извлечение знаний (получение наиболее полного представления о предметной области и способах принятия решения в ней). Происходит перенос компетентности экспертов на инженеров по знаниям с использованием различных методов: анализ текстов; диалоги; экспертные игры; лекции; дискуссии; интервью; наблюдение и другие.

Основным методом являлся анализ текстов с целью извлечения и структурирования знаний, который включал:

- составление «базового» списка литературы для ознакомления с предметной областью и чтения по списку;
- выбора текста для извлечения знаний;
- первое знакомство с текстом (беглое прочтение) и формирование первой гипотезы о структуре текста;
- внимательное прочтение текста с выделение ключевых слов и выражений, т.е. выделение «смысловых вех» (компрессия текста);
- определение связей между ключевыми словами, разработка макроструктуры текста в форме графа или «сжатого» текста (реферата);
- формирование поля знаний на основании структуры текста.

3. Структурирование или концептуализация знаний (разработка неформального описания знаний о предметной области в виде графа, таблицы, схемы, диаграммы или текста, которое отражает основные концепции и взаимосвязи между понятиями предметной области).

Сделана детальная разработка нескольких наиболее актуальных ветвей дерева знаний по темам «Опустынивание и его мониторинг», «Влияние орошения на различные виды вод», «Способы орошения».

Уточнена сопутствующая этим темам терминология. Материал представлен в виде толкового (терминологического) словаря с библиографическими ссылками. Понятийные определения вводятся в базу знаний, как общепринятые термины и объяснения, которые могут служить универсальными для всех частей света.

Построение дерева базы знаний учитывает иерархическую структуру взаимосвязанных элементов областей знаний и явлений, а также существующие системы кодировок и классификаций в странах, где проводятся исследования, и в странах, где будут использоваться эти знания.

Классификация (рубрицирование) информации для базы знаний на основе ГРНТИ[6]

Значительное место в структуре информационных систем занимают иерархические классификации. На государственном уровне регламентация использования иерархических классификаций осуществлялась введением ГОСТ 7.44-84 «Систематизация документов. Общие требования», а затем ГОСТ 7.59-90 «Индексирование документов. Общие требования к систематизации и предметизации». В соответствии с этим ГОСТом библиотеки, органы научно-технической информации и другие организации обязаны применять одну или несколько универсальных систем классификации из числа следующих: Государственный рубрикатор (ГР); Универсальную десятичную классификацию (УДК); Библиотечно-библиографическую классификацию (ББК); Международную классификацию изобретений; Классификатор «Стандарты и технические условия». Каждая из иерархических классификаций учитывает специфические особенности «своих» объектов систематизации и имеет определенную сферу применения.

Для классификации материалов в базе знаний по земельным и водным ресурсам бассейна Аральского моря был выбран Государственный рубрикатор научно-технической информации (ГРНТИ).

Рубрикатор представляет собой сложную иерархическую систему классификации областей науки, которая применяется для систематизации документов и представления их в базах данных и информационных изданиях. По существу это информационно-поисковый язык классификационного типа с иерархической структурой, политематический по содержанию. На каждом уровне (исключая первый) предусмотрено наличие резервных позиций, что позволяет в процессе ведения (совершенствования и развития) рубрикатора вводить новые рубрики, не изменяя коды существующих. Система индексов представлена группами двузначных чисел, разделенных точками, используются арабские цифры.

Полученные результаты

Система кодировки (рубрикатор) НИЦ МКВК представлена в табл. 1. Также для классификации информационных материалов были использованы следующие разделы рубрикатора ГРНТИ: 68.00 Сельское и лесное хозяйство; 70.00 Водное хозяйство. Для завершенных и текущих проектов на-

---

[6] Выбор рубрикатора ГРНТИ обусловлен тем, что когда на месте бывшего СССР образовалось содружество независимых государств, между ними были заключены соглашения в области стандартизации и научно-технической информации, предусматривающие, что прежние ГОСТы сохраняют силу для всех стран СНГ, а новые стандарты разрабатываются совместно как межгосударственные стандарты.

ряду с вышеуказанными рубрикаторами использовалась серийно-порядковая система кодирования с использованием ключевых слов и библиографических ссылок (пример описания завершенного проекта в табл. 2).

Таблица 1. Рубрикатор НИЦ МКВК для орошаемого земледелия

Код НИЦ	**Рубрика**	**Кодификация ГРНТИ**
01.00	Орошаемое земледелие	68.31.21
01.10	Водные ресурсы	70.21.09
01.10.01.	поверхностные воды	70.27.07
01.10.02	подземные воды	70.27.07
01.10.03	Возвратные воды	70.27.07
01.10.04	Сточные воды	70.25
01.15	Качество воды	70.27
01.20	Орошаемые земли	70.21.41
01.20.01	Почвы	68.05
01.20.01.10	Регулирование водного режима почв. Баланс влаги в почве	70.03.15
01.20.01.13	Фильтрация и инфильтрация в почвогрунтах	70.03.17
01.20.01.15	Динамика водного режима. Водно-солевой режим почв	70.03.21
01.20.02	Плодородие	68.05.23
01.20.03	Сельхозкультуры	68.35
01.20.05.10	Водопотребление	70.03.11
01.20.05.13	Режим орошения	
01.20.05.15	Севооборот	68.29.07
01.20.05.20	Урожай	68.29.23
01.30	Орошение	70.21
01.30.01	Инфраструктура	70.21.15
01.30.02	Ирригационные системы и управление	70.21.15
01.30.03	Способы орошения	70.21.31
01.30.09	Влияние орошения на различные виды вод	70.01.94
01.40	Засоление	68.05.41
01.40.01	Типы засоления	
01.45	Способы борьбы с засолением	70.21.39
01.45.01	Дренаж	70.23
01.45.01.10	Виды дренажа	70.23.39
02.00	Опустынивание и его мониторинг	
02.01	Причины опустынивания	
02.01.10	Естественные (аридизация климата, эоловый перенос, соленакопление)	
02.01.15	Антропогенные (вырубка лесов, перепас скота, техногенные нарущения)	
02.02	Индикаторы опустынивания	
02.03	Критерии	
02.04	Методы мониторинга	
02.04.10	Наземный (отбор почвенных проб и солемеры)	
02.04.15	Дистанционный (аэро и спутник)	

Таблица 2. Завершенные проекты (формат описания)

Идентификатор НИЦ МКВК	ПП00061
Название проекта	Изучение эффективности использования минерализованных дренажных вод в местах их формирования
Местоположение	Республика Узбекистан, Ферганская обл., Бувайдинский р-н, колхоз им. XX партсъезда
Рубрика (по ГАСНТИ)	70.03.21; 70.27.07
Код НИЦ МКВК	01.10.03
Продолжительность проекта	1976-1986 гг.
Руководитель проекта	Якубов Мурат, Институт водных проблем АН РУз Республика Узбекистан, 700143, г. Ташкент, ул. Ф. Ходжаева, 25а
Реферат (основное содержание) проекта:	Исследования направлены на установление возможности и эффективности использования минерализованных дренажных вод в местах их формирования, в целях снижения объема отвода возвратного стока. Проведены эксперименты по управлению водно-солевыми режимами почв при использовании минерализованных вод на орошение и промывку земель, а также качеством дренажного стока. Климат - резко континентальный. Площадь ОПУ нетто – 94 га. Оросительная сеть - бетонные лотки. Дренажная сеть - открытая горизонтальная. Удельная протяженность – 45 м/га. Глубина заложения дрен - 2,5-3,0 м, коллекторов - 4,0 м. За период проведения опытов при поддержании промывного режима орошения в годовом и многолетнем цикле достигнуто медленное рассоление почв. Минерализация грунтовых вод снизилась с 15 до 5 г/л. Минерализация дренажных вод снизилась с 8-10 до 4-4,5 г/л. При установленных режимах орошения наряду с улучшением культуры земледелия и мелиоративного состояния земель произошел рост урожайности хлопчатника с 7-8 ц/га (1977) до 28-30 ц/га (1986). Разработаны научно-обоснованные предложения по оптимизации мелиоративных режимов и повышению продуктивности орошаемых земель при использовании минерализованных вод на орошение.
Ключевые слова	Режим орошения; водно-солевой баланс; дренажный сток; минерализованные воды
Библиография	**Усманов А.У., Бекмуратов Т.У.** Использование вод, откачиваемых скважинами вертикального дренажа, на орошение староорошаемых земель Ферганской долины // Труды САНИИРИ. - 1980. - Вып. 160. - С. 43-49. **Якубов М.А.** Динамика водно-солевого режима почвогрунтов при длительном использовании минерализованных вод на орошение в условиях Центральной Ферганы // Труды САНИИРИ. - 1985. - Вып. 173. - С.123-136.

Созданный на основе рубрикатора подраздел «Орошаемое земледелие» дерева знаний «Земельное и водные ресурсы бассейна Аральского моря» приведен на рис. 1.

Разработанный систематический набор факторов и следствий, связанный с основными определениями (предметом, явлением, фактором и т. д.) развития по темам «Опустынивание и его мониторинг», «Влияние орошения на различные виды вод», «Способы орошения» показан на следующих схемах (рис. 2-4).

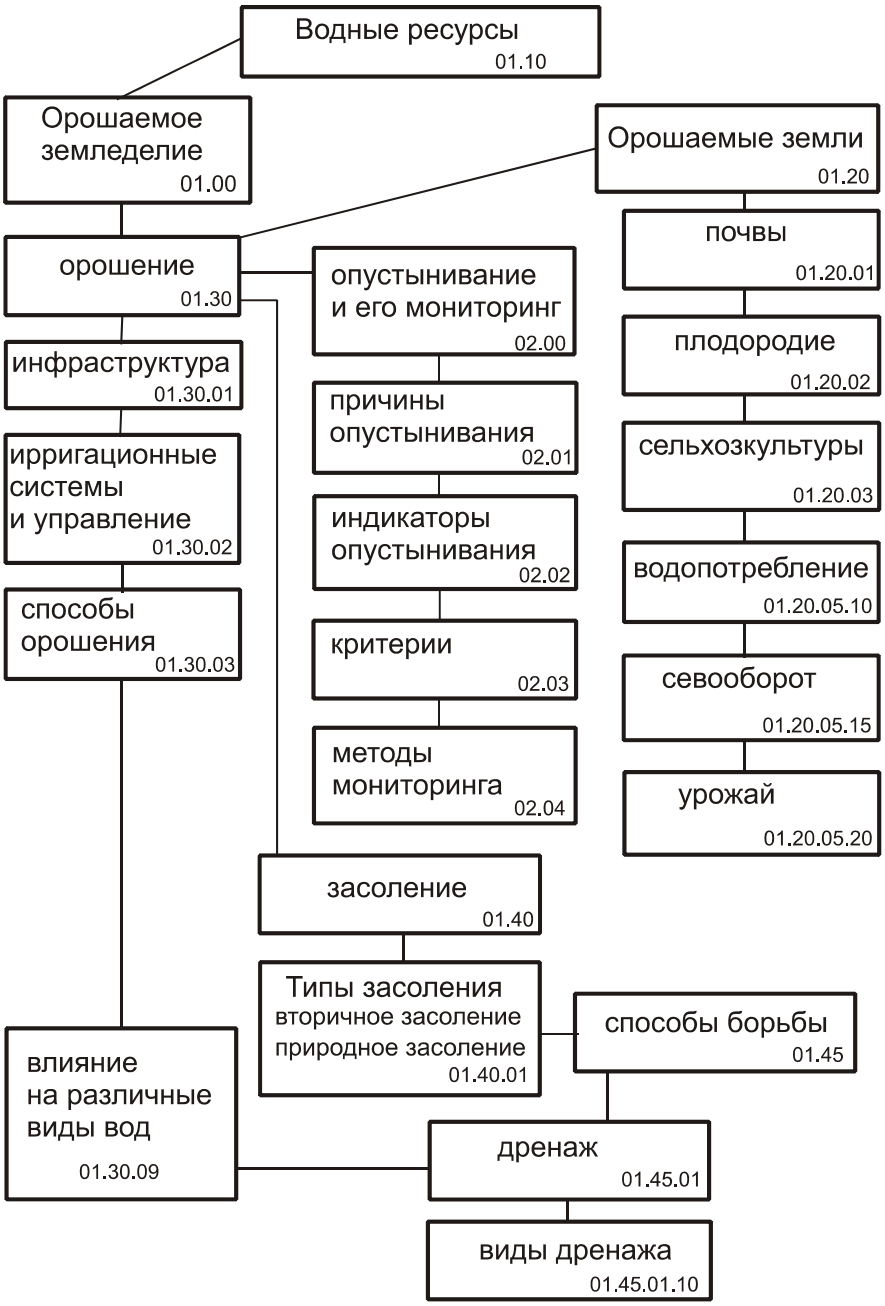


Рис.1. База знаний «Земельные и водные ресурсы бассейна Аральского моря» подраздел ОРОШАЕМОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

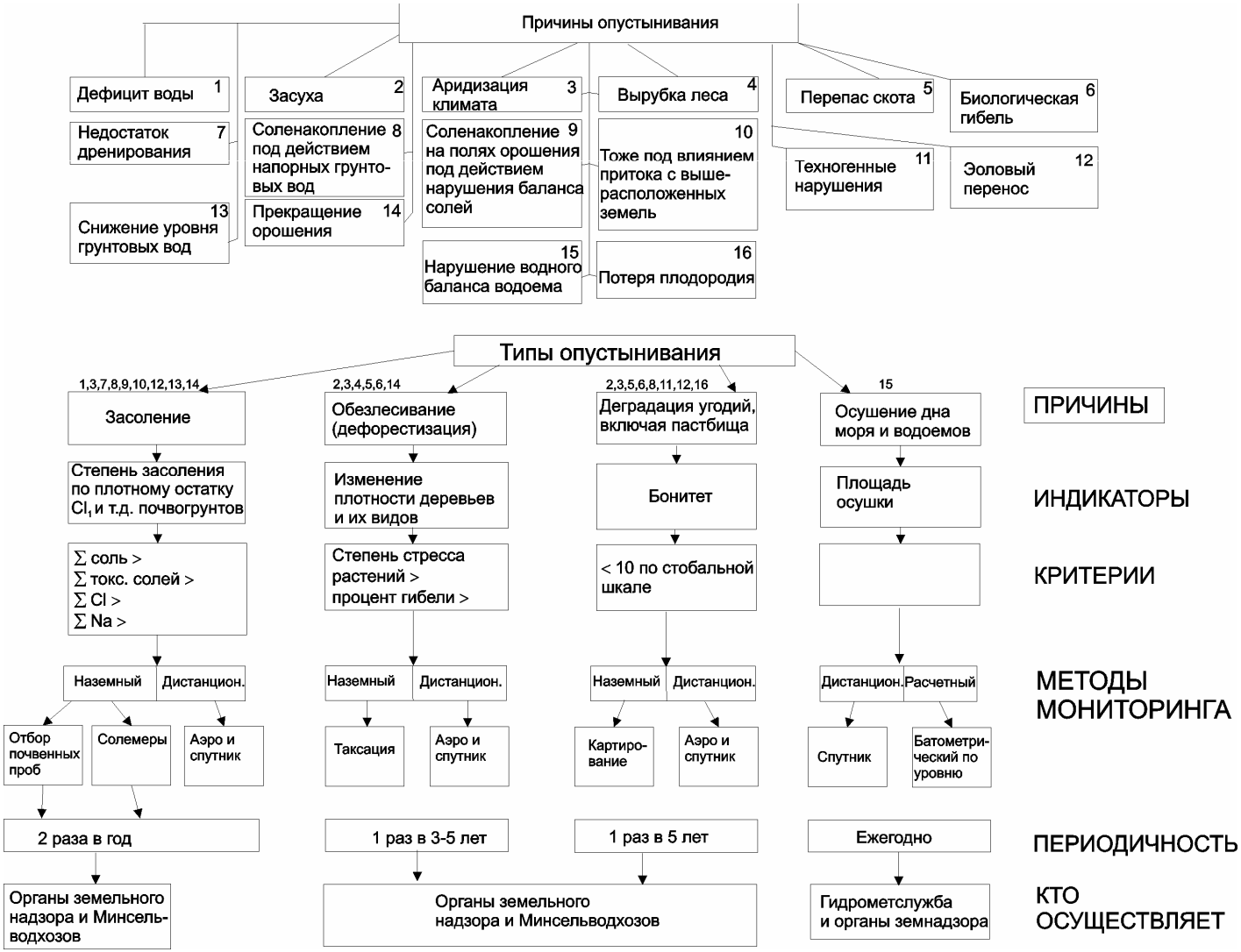


Рис. 2. Опустынивание и его мониторинг

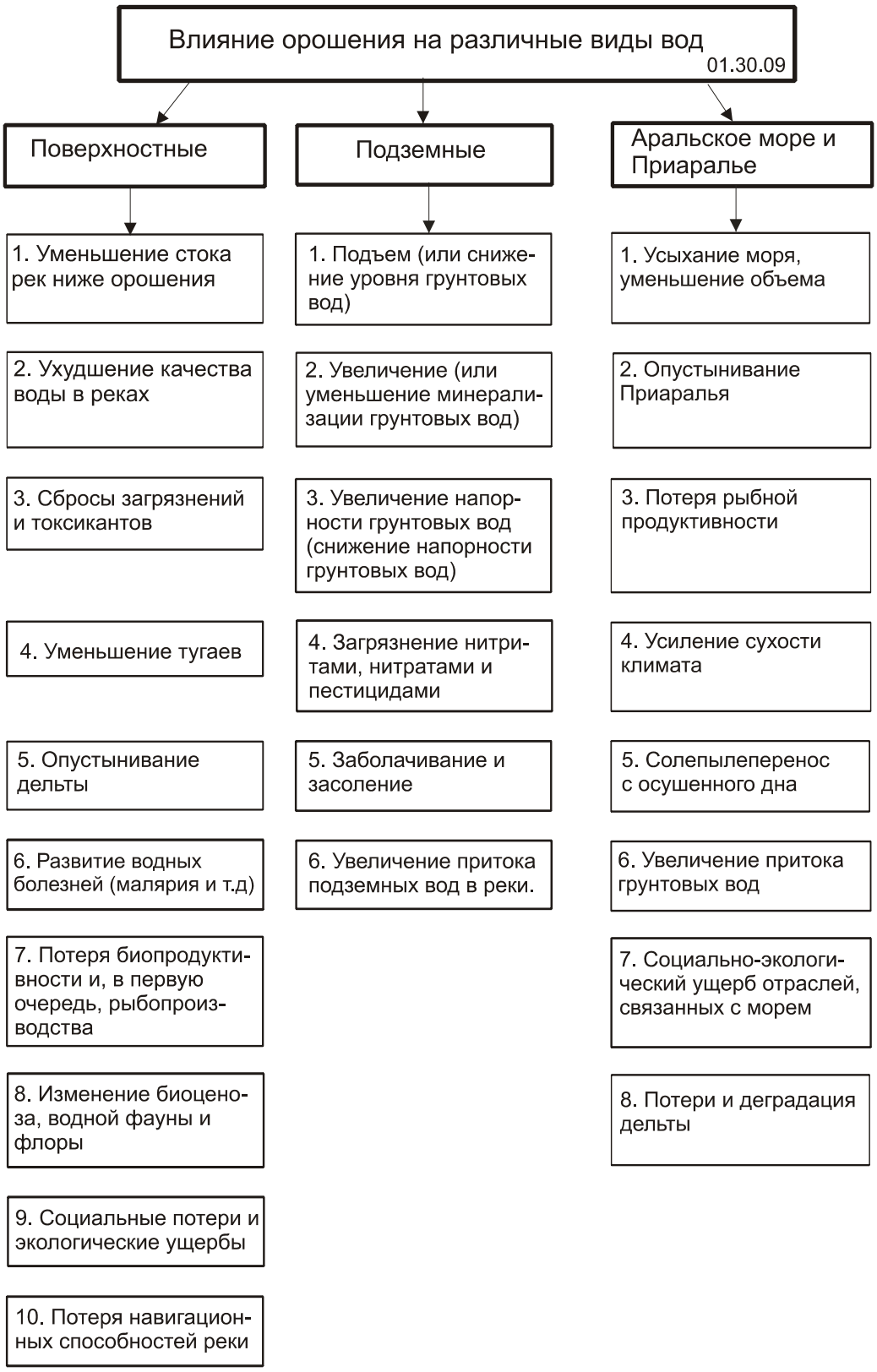


Рис. 3. Влияние орошения на различные виды вод

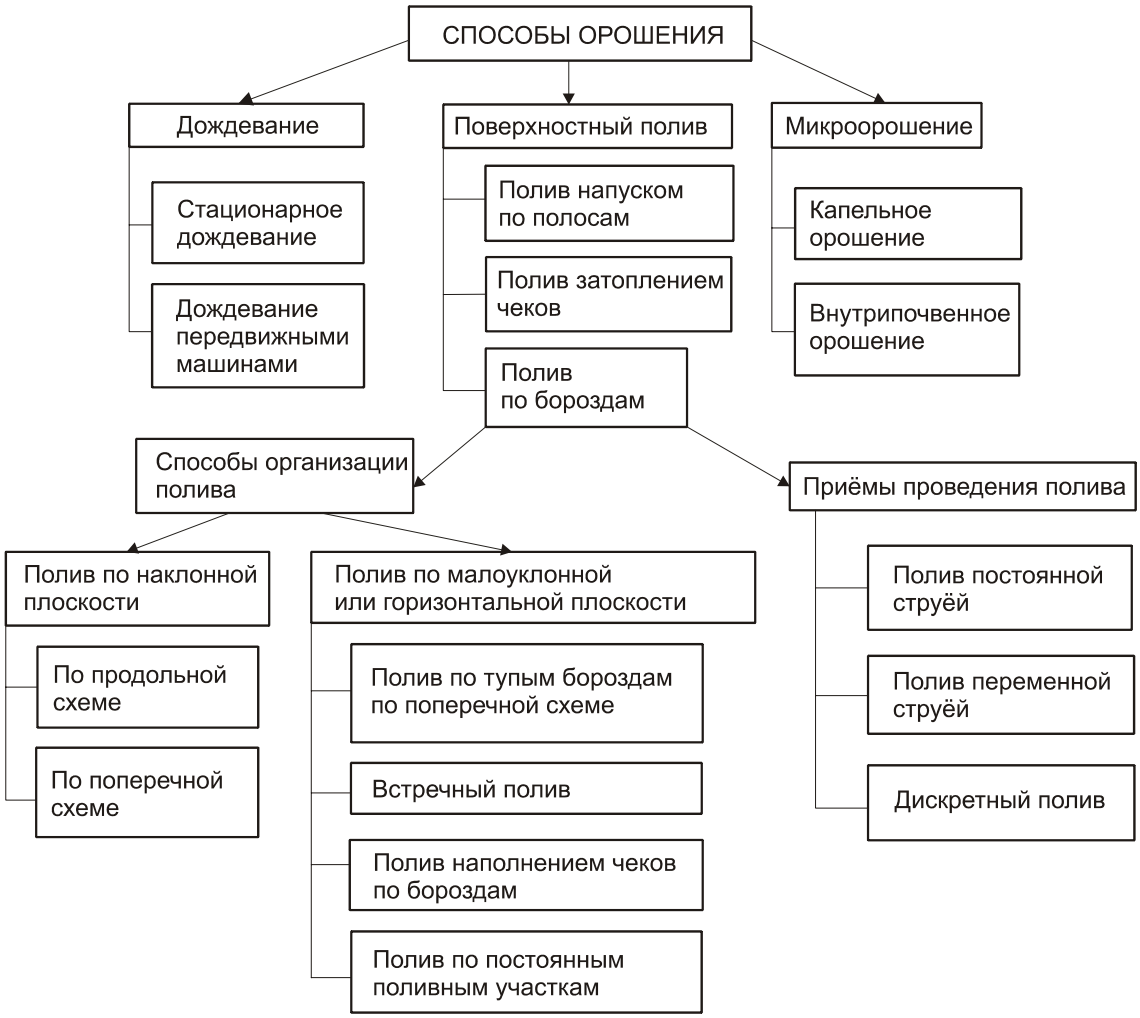


Рис. 4. Способы орошения

Создан толковый (терминологического) словарь, в котором даются определения для 110 используемых понятий (терминов) по основным темам проекта. В библиографический указатель вошли ссылки на 138 изданий (книги, статьи, рефераты). Собран и обработан материал по 65 текущим (незавершенным) с участием доноров проектам и по 216 пилотным (завершенным) проектам в странах центральноазиатского региона.

Таблица 3. Общее количество документов, уже включенных
в разделы базы знаний согласно принятому формату описания

Рубрика	Количество документов (пилотные проекты)
Орошаемое земледелие	1
Подземные воды	2
Качество воды	8
Орошаемые земли	1
Регулирование водного режима почв. Баланс влаги в почве.	18
Фильтрация и инфильтрация в почвогрунтах.	1
Динамика водного режима. Водно-солевой режим почв	51
Плодородие	2
Водопотребление	6
Режим орошения	36
Ирригационные системы и управление	8
Способы орошения	42
Способы борьбы с засолением	27
Дренаж	2
Виды дренажа	14

Распространение информации

На следующем этапе работы по РП-1, для того чтобы сделать информацию доступной для всех участников проекта и их партнеров, создается раздел на веб-сайте НИЦ МКВК (www.sic.icwc-aral.uz/projects/copern/), где размещается информационный пакет материалов полученных на первом этапе (рис. 5).

Рис. 5. Главная страница веб-сайта проекта CIRMAN-ARAL

При создании информационного ресурса в интернете для БЗ проделана следующая работа.

1. Разработана структура и дизайн страниц на основе подготовленных материалов. Это делалось с учетом того, что просмотр страниц веб-сайта должен быть возможен при любых разрешениях без каких-либо искажений. Проведена оптимизация кода веб-сайта для возможности просмотра страниц во всех основных интернет браузерах и их версиях.

2. Осуществлено конвертирование и форматирование страниц. Проведена оптимизация графического материала веб-сайта (как структурного, так и информационного) для минимизации времени загрузки с сервера пользователем веб-сайта.

3. Были разработаны две панели навигации с кнопками, глобальная для всего раздела (расположена вверху всех страниц, включает в себя ссылки на все подразделы по рабочим пакетам, указывая в этом ряду место текущей страницы-подраздела) и локальная для подраздела «Base of knowledge». При создании навигации преследовалась одна общая цель – наглядно представить текущее положение пользователя и возможные варианты его перемещения по структуре информационного пространства. Строка зеленых кнопок в верхней части всех страниц позволяет легко идентифицировать текущее положение на сайте, а также дает возможность простого доступа к первой странице и всем подразделам (рис. 6).

Рис.6. Главная навигационная панель, нажатая синяя кнопка указывает на текущий подраздел по Рабочему пакету - 2 (WP-2)

В дополнение к перемещению по всему пространству сайта пользователям необходима возможность передвижения внутри локальной области (подраздела) рис. 7.

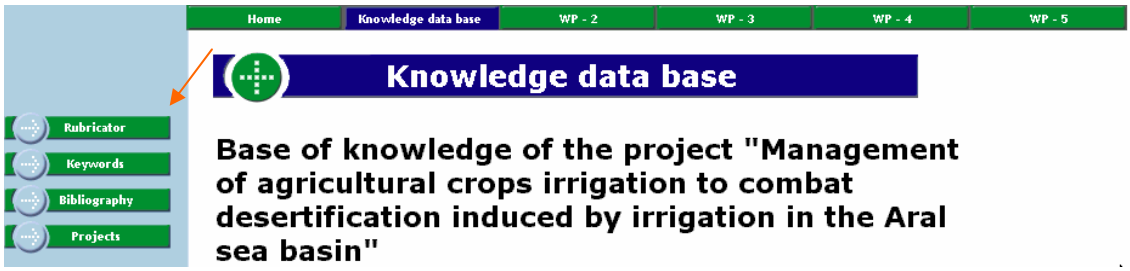


Рис.7. Локальная навигационная панель раздела «Base of Knowledge»

В панель навигации раздела базы знаний входят ссылки на «Рубрикатор», «Ключевые слова», «Библиография» и «Проекты». Перекрестные ссылки связывают информацию по прошлым исследовательским проектам в соответствии с классификационной системой (рубрикатором), разработанным НИЦ МКВК, семантическая связь отражается также в систематиче-

ском наборе факторов и следствий, связанных с основными понятиями в разделе «Ключевые слова», которые в свою очередь связаны с разделом «Библиография». Понятийные определения вводятся в базу знаний, как общепринятые термины и объяснения, которые могут служить универсальными для всех частей света.

На заключительном этапе база знаний проекта CIRMAN-ARAL была дополнена следующими методическими материалами:

1. Методы определения продуктивности земель.
2. Методы повышения продуктивности земель.
2. Методы определения водопотребления
3. Методы определения водного и солевого баланса.
4. RZWQM (модель физико-химико-биологических процессов для моделирования роста растений и переноса воды, питательных веществ и пестицидов в корневой зоне на репрезентативной площади системы сельхозпроизводства.).
5. Методы определения параметров дренажа, методы оценки эффективности существующего дренажа, рекомендации по использованию минерализированных вод.

Для пользователей, использующих программные продукты CROPWAT, WIN ISAREG, GISAREG подготовлены электронные версии изданий на русском языке:

1. Учебное пособие по CROPWAT, разработано отделением земельных и водных ресурсов Комиссии по сельскому хозяйству и продовольствию ООН и предназначено для вычисления водопотребления сельхозкультур на основе климатических данных, почвенных характеристик и параметров сельхозкультур.
2. Руководство пользователя по WIN ISAREG. Программа ISAREG создана в Техническом университете Лиссабона (Португалия) под руководством проф. Л.С. Перейры. Она позволяет вести расчеты, как за многолетний период наблюдений, так и работать с данными одного года по желанию пользователя, можно получить поливные и оросительные нормы для определенной культуры, графики влажности почвы за вегетацию, сравнения наблюденной и расчетной влажности почв.
3. Руководство по использованию модели GISAREG, которая предназначена для составления графиков поливов на базе ГИС для улучшения водопользования и экологического контроля.

Заключение

Создание базы знаний проекта CIRMAN-ARAL на основе использования современных информационных технологий позволяет максимально эффективно использовать уже накопленную информационную базу по материалам завершенных исследовательских проектов и научным изданиям. В

БЗ собрана информация, актуальная не только для центральноазиатских стран, но и для других регионов, по проблемам, связанным с процессом опустынивания, включая его мониторинг; воздействием орошения на поверхностные, подземные воды и Аральское море.

База знаний предоставит пользователям (ученым, практикам, экологам, политикам, да и всему обществу) необходимую и легкодоступную информацию для рационального использования водно-земельных ресурсов. Еще раз отметим, что основной целью базы знаний должно быть распространение передового опыта, достижений, методологии в области водного хозяйства (конкретные примеры решения проблем, описания пилотных проектов и т. п.), распределенных по ветвям дерева знаний (по подрубрикам): ирригация, дренаж, гидросооружения и т. д.

Мы считаем, что дальнейшее развитие базы знаний по использованию земельных и водных ресурсов бассейна Аральского моря в рамках других проектов Шестой Рамочной программы по используемой нами методике имеет очень хорошую перспективу, так как совпадает с курсом ЕС на создание общества, построенного на знаниях.

Библиография

Гендина Н.И. Иерархические классификации в структуре лингвистического обеспечения современной информационно-библиотечной технологии: проблемы комплексного использования, актуализации и развития / Препринт. – М.: ГПНТБ России, 1998. – 15 с.

ГОСТ 7.44-84 Систематизация документов. Общие требования // Стандарты по библиотечному делу и библиографии. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – С. 201-204.

Государственный рубрикатор научно-технической информации / ВИНИТИ. – М., 2000.

Универсальная десятичная классификация (в 7 вып.). – 3-е изд. – М.: Изд-во стандартов, 1979.

Глава 4.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ С ЦЕЛЬЮ БОРЬБЫ С ПРОЦЕССАМИ АНТРОПОГЕННОГО ОПУСТЫНИВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ)

В.И. Соколов[7], А.И. Тучин[7]

Реферат: В статье приведены ключевые данные о Ферганской долине – где размещен пилотный объект проекта CIRMAN-ARAL, а также дано краткое описание созданной информационной системы, содержащей данные, необходимые для развития проекта и моделирования процессов, связанных с орошением сельхозкультур. Показана структура системы и процесс ее построения в три этапа: 1) создание топологии изучаемой территории; 2) мониторинг, требуемый для регулярного пополнения информации; 3) построение ГИС и базы данных для моделей и системы принятия решений.

Ключевые слова: Интегрированное управление водными ресурсами, антропогенное опустынивание, база данных, математические модели, интерфейс.

Введение

Информационная система для управления орошением строится по уровням иерархии управления водными и земельными ресурсами и связанными с ними объектами водопользования, а также уровнями формирования и использования водных ресурсов (на примере Ферганской долины, рис. 1). Система унифицированная, т. е. обеспечивает единство (либо совместимость) технических средств, технологий и методик сбора, обработки и анализа информации, сроков и параметров оценки расходных и качественных характеристик наличных и используемых земельных и водных ресурсов, а также идентичность программных и табличных продуктов, форм сбора и передачи различного вида информации по иерархическим уровням. Система позволяет осуществлять контроль соответствующих показателей основных четырех уровней иерархии существующего водохозяйственного управления:

[7] Научно-информационный центр МКВК. Узбекистан, 700187, г. Ташкент, м-в Карасу-4, дом 11; vadim@icwc-aral.uz

Уровень 1 - Фермерские хозяйства, включая отдельные поля;

Уровень 2 - Ассоциация водопользователей (АВП) и коллективные хозяйства;

Уровень 3 - Оросительная система;

Уровень 4 - Бассейн (Ферганская долина – бассейн Сырдарьи).

Следует отметить, что третий уровень является связующим для различных существующих баз данных - региональной базы данных “WARMIS” и базы данных IWRM-Fergana. Здесь же происходит стыковка и с базой данных БВО.

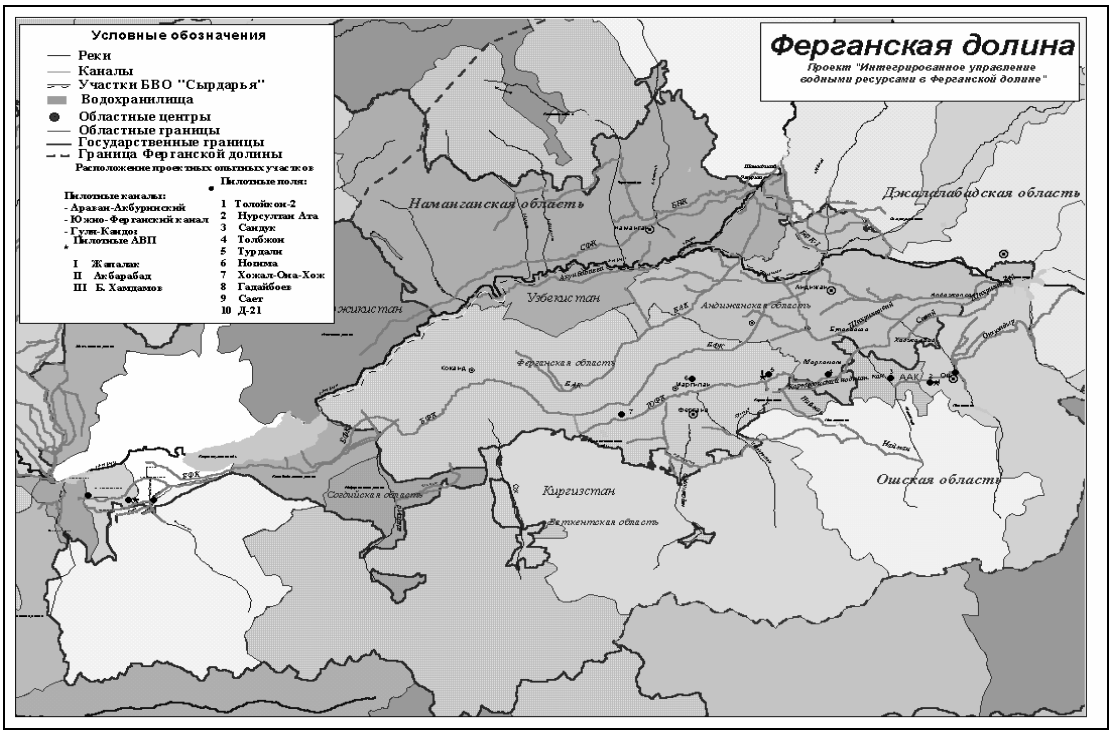


Рис. 1. Ферганская долина
(источник: проект «ИУВР-Фергана»)

Каждый уровень содержит соответствующую базу данных, предназначенную для централизованного хранения и управления совокупностью взаимосвязанных данных, адекватно отображающих состояние объектов данного уровня и отношения между ними.

Уровень 1 - база данных включает все основные параметры водопользования и сельскохозяйственного производства. В качестве основных используются показатели, характеризующие состояние отдельных полей, водохозяйственную деятельность и мелиоративное состояние орошаемых земель в разрезе хозяйствующих субъектов, водозабор из оросительных систем и использование водных и земельных ресурсов на уровне хозяйств, показатели, отражающие структуру посевных площадей, показатели сельхозпроизводства на орошаемых землях, показатели технического уровня внут-

рихозяйственной оросительной сети. Также база данных содержит информацию наземных наблюдений для оценки уровня продуктивности земель с использованием ГИС и дистанционных методов. Основное назначение базы данных – способствовать выработке оценок по эффективному использованию водных и земельных ресурсов на уровне хозяйства в сопоставлении с потенциальным уровнем продуктивности воды и земли.

Уровень 2 – база данных включает все основные параметры функционирования существующих ассоциаций водопользователей. В качестве основных используются показатели финансового обеспечения эксплуатационных затрат оросительной и коллекторно-дренажной сети, показатели равномерности подачи воды по группе хозяйств (вегетационный, межвегетационный периоды), показатели по орошаемой и дренируемой площадям, показатели, отражающие состояние и динамику мелиоративного состояния орошаемых земель и технических средств в типичных хозяйствах и т. п. Основное назначение базы данных – способствовать выработке оценок эффективности функционирования существующих АВП (групп хозяйств) и обоснованию эффективности вновь создаваемых АВП.

Уровень 3 – база данных включает все основные параметры функционирования водохозяйственных организаций (систем). В качестве основных используются показатели, отражающие объемы водозаборов из источников орошения в разрезе административных единиц и основных каналов, показатели, характеризующие объемы водоподачи на орошение (потребные объемы водоподачи, выделенные лимиты, фактические объемы) в разрезе административных единиц и источников водных ресурсов, технические КПД оросительных систем и размеры организационных потерь, показатели, характеризующие финансово-экономическую деятельность водохозяйственных систем в разрезе основных структурных подразделений. Основное назначение базы данных – способствовать выработке оценок эффективности функционирования водохозяйственных организаций (систем).

Уровень 4 – база данных включает все основные параметры, характеризующие регион (Ферганскую долину и бассейн реки Сырдарьи) в целом.

Ферганская долина – территория пилотного исследования

Ферганская долина – один из древнейших оазисов мира, где возраст орошения и развития цивилизации, такой же, как и в Индии, Египте, Китае, Ближнем Востоке – исчисляется несколькими тысячелетиями. Ферганская долина расположена в юго-западной части обширной горной системы Тянь-Шань, ледники и снега которой питают водою реки Нарын и Карадарью. Обе реки выходят на долину на востоке и, сливаясь, образуют реку Сырдарью, которая течет в направлении на юго-запад и разделяет Фергану на две несимметричные части. Протяженность долины около 250 км, если считать в направлении от Учкурганской ГЭС на Нарыне до г. Ходжента, и около 300 км, если считать от Кампырраватской плотины на Карадарье. Ширина долины в створе Кассан – Наманган – Фергана – Вуадиль достигает 130 км и сужается на западе до 5–10 км. С востока долина окаймлена Ферганским,

с юга – Алайским и Туркестанским, с севера – Чаткальским и Кураминским хребтами.

Рис. 2. Головное сооружение канала Ходжабакирган

Значительная часть притоков реки Сырдарья в пределах долины – более тридцати – в настоящее время не доходят до Сырдарьи, так как их вода разбирается на орошение. К наиболее крупным боковым рекам относятся: Падшаата, Гавасай, Касансай, Караунгур, Кугарт, Ак-Бура, Аравансай, Исфайрамсай, Шахимарданский, Сох, Исфара, Ходжабакирган и др., стекающие главным образом с Ферганского и Туркестанского хребтов. Река Сырдарья формирует около 70 % всего стока поверхностных вод Ферганской долины, остальные реки формируют около 30 % (табл. 1).

Таблица 1. Поверхностный сток из зоны формирования в бассейне реки Сырдарья и его доля в Ферганской долине (км^3/год)

Река по гидрометрическому посту	Приток из зоны формирования стока		
	Максим. (P=5%)	Средне-многолетний	Миним. (P=90%)
Бассейн Сырдарьи, всего	58,91	37,20	23,97
Сырдарья до Чардары	54,46	35,42	23,44
Нарын - Учкурган	20,68	14,54	10,68
Карадарья – приток в Андижанское вдхр.	6,49	3,92	1,83
Реки междуречья (Нарын-Карадарья)	3,69	2,07	1,10
Правый берег Ферганской долины	2,16	1,18	0,73
Левый берег Ферганской долины	5,79	4,54	3,49
Итого Ферганская долина	38,81	26,25	17,83
Доля Ферганской долины в: - стоке Сырдарьи, всего % - в стоке до Чардары, %	65,9	70,6 74,1	74,4 76,0

С древних времен привлекательные жизненные условия этого оазиса способствовали земледельческому развитию. Ниже приведена ирригационная характеристика земель Ферганской долины в разрезе стран (таблица 2). В результате Ферганская долина превратилась в один из самых густонаселенных регионов Центральной Азии. Характерными являются высокая плотность населения, высокие темпы развития и большая демографическая нагрузка вследствие низкой миграционной способности сельского населения (таблица 3).

Таблица 2. Ирригационная характеристика земель Ферганской долины, тысяч гектаров

Регион, государство	Территория	Пригодно для орошения	Орошение			Свободных земель
			1930	1970	2000	
Ферганская долина	9053	1539	675	1066	1376	163
Кыргызстан	6408	341	162	214	331	10
Таджикистан	699	197	39	97	134	63
Узбекистан	1946	1001	474	755	911	90

Таблица 3. Демографические показатели Ферганской долины (2000 год)

Показатели	Области						
	Андижанская	Ферганская	Наманганская	Согдийская	Ошская	Джалал-абадская	Баткентская
Количество населения, тыс..чел.	2216,5	2697,5	1953,2	1904	1211,7	893,9	384
В т.ч. сельского, тыс. чел.	1550,9	1916,7	1221,4	1245	926,3	685,6	310,3
Рост населения, % в год	2,4	2,4	2,7	1,4	1,83	1,61	1,5
Плотность населения, чел./км^2	527,7	402,6	263,9	75,2	41,5	26,5	23,3
Орошаемая земля, га на 1 чел.	0,171	0,186	0,222	0,145	0,159	0,192	0,184

Как видно из таблицы 3, сельское население составляет от 62,5 % в Наманганской до 77 % в Ошской областях. Если учесть, что на 1 человека в сельской местности приходится в среднем от 0,16 до 0,222 га, а резервы земли, возможные к орошению (таблица 2) почти что исчерпаны, то становится ясно, что решение проблем социального благополучия в долине лежит лишь в подъеме производства орошаемого земледелия, усилении вторичной переработки и развитии малого и среднего предпринимательства, как в сфере аграрного, так и других отраслей.

В то же время показатели последних лет, особо в Узбекистане, свидетельствуют о нарастании социальной напряженности – население увеличивается на 2,4-2,7 % в год (таблица 4), трудовые ресурсы в сельской местности используются непосредственно в аграрном секторе менее, чем наполовину, темп роста ВВП от 2,9 % до 7 % при среднем уровне ВВП на душу населения 377–572 $/чел. в год – значительно ниже среднего по стране.

Таблица 4. Социально-экономические показатели областей Ферганской долины за 2000 г.

Показатели	Андижанская	Наманганская	Ферганская
ВВП млрд. сум	260,55	167,92	326,783
ВВП в млн. долл. США	1267	746	1562
ВВП на душу населения	566	377	572
Темпы роста ВВП, %	7	5,8	2,9
Темпы роста населения, %	2,4	2,7	2,4
Трудовые ресурсы, тыс. чел.	1104	939	134
в т.ч. в сельской местности	761	586	951
Занятость в сельском х-ве	339	245	420
% сельского населения	69,0	62,5	71
Среднемесячная з/п в сумах	8573	8053	9039

Уже в настоящее время число неработающего населения в долине превысило несколько сотен тысяч человек. Ясно, что снижение производства орошаемого земледелия и спад удельных показателей доходности из-за деградации земель превратили обеспеченность водой и другими условиями производства в исключительно важные и приоритетные задачи.

Ирригационный комплекс Ферганской долины обслуживает в настоящее время более 40 тысяч самостоятельных водопользователей, из которых 38,5 тыс. фермеров, 1,5 тыс. коллективных хозяйств, 119 Ассоциаций фермеров и 306 неирригационных потребителей. Водоподача осуществляется по 12,4 тыс. км межхозяйственных каналов и более 9,5 тыс. км межхозяйственных коллекторов. Ирригационные системы и сооружения, функционирующие в настоящее время в долине, построены еще в советское время и срок их службы исчисляется десятилетиями. Некогда технически совершенные каналы и сооружения требуют коренной реабилитации или проведения восстановительных работ. Это практически касается значительной части магистральной и всей межхозяйственной ирригационной сети и, не в меньшей степени внутрихозяйственной, которая еще в советское время отставала от межхозяйственной.

Фактическое наличие и распределение объемов водозабора и водоподачи из источников водных ресурсов по Ферганской долине в целом и в разрезе государств, характеризуются в таблице 5.

Таблица 5. Общий объем водозабора, водоподачи и водоотведения по Ферганской долине на уровне 2000 года

Государство	Общий объем воды забираемой из источников		Общий объем водоподачи на границах хозяйств		Общий объем водоотведения	
	млн. $м^3$	%	млн. $м^3$	%	млн. $м^3$	% от водозабора
Республика Узбекистан	10161,1	69,7	7931,1	69,1	3790	37,3
Кыргызская Республика	2675,8	18,4	2155,1	18,8	764,2	28,56
Республика Таджикистан	1728,9	11,8	1391,0	12,1	672,5	38,9
Всего	14565,9	100,0	11477,2	100,0	5226,7	35,88

База данных и модельный комплекс состоят из следующих блоков:

- Справочная информация и паспорта полей. В этом блоке определены справочники, описывающие постоянную или мало меняющуюся информацию: республики, области, районы, фермерские хозяйства, приток, поля, каналы, водовыпуски, отток, транзит, гидропосты, створы, скважины, тип дренажного стока, вид полива, тип водослива, сельхозкультуры. А также: структура хозяйства (план-схема оросительной сети, харак-

теристики ГП, характеристики участков, характеристики каналов, паспорт поля)

- Регистрация фактических данных: ведомости расходов воды на ГП, рапорта
- Ввод и корректировка норм полива
- Работа с грунтовыми водами и засоление почв: УГВ по створам, УГВ по полям, УГВ (GIS), Засоление почв и типы почвенных разностей
- Дренажный сток - ввод и корректировка данных дренажного стока
- Климатические данные: средне-многолетние, декадные, суточные
- Математическая модель, рассчитывающая план водоподачи на поля
- Методы и рекомендации: Методы повышения продуктивности земель, Рекомендации по использованию минерализованных вод, Методы определения продуктивности земель, Методы определения параметров и оценка эффективности дренажа, Методы определения водно-солевого баланса, Методы определения водопотребления, Модель RZWQM.

По каждому блоку имеются отчеты, данные могут представляться в табличном или графическом виде.

Программа создана на базе СУБД ACCESS и представляет собой набор файлов:

- «CopernicusEng и CopernicusRus», в которых собрано все программное обеспечение, рабочие временные таблицы, запросы, формы ввода и корректировки информации и отчеты
- «Copern_Data» – место хранения всех данных за один сезон или год.

Файлов типа «Copern_data» может быть несколько, в зависимости от необходимости хранения данных за предыдущий период. В Меню «Переключение на другой год» пункт «Выбор» позволяет выбрать необходимый из них, а пункт «Новый» создает новый файл типа «Channel_data» с копией Справочников из текущего файла и пустыми таблицами (форматами) документов.

При загрузке программы на экране появляется главное окно (рис. 3), а также меню, из которого можно запустить остальные блоки. В Главной Форме определяется фермерское хозяйство (ирригационная система), для которого производится расчет параметров водораспределения. Опции меню показаны в табл. 6.

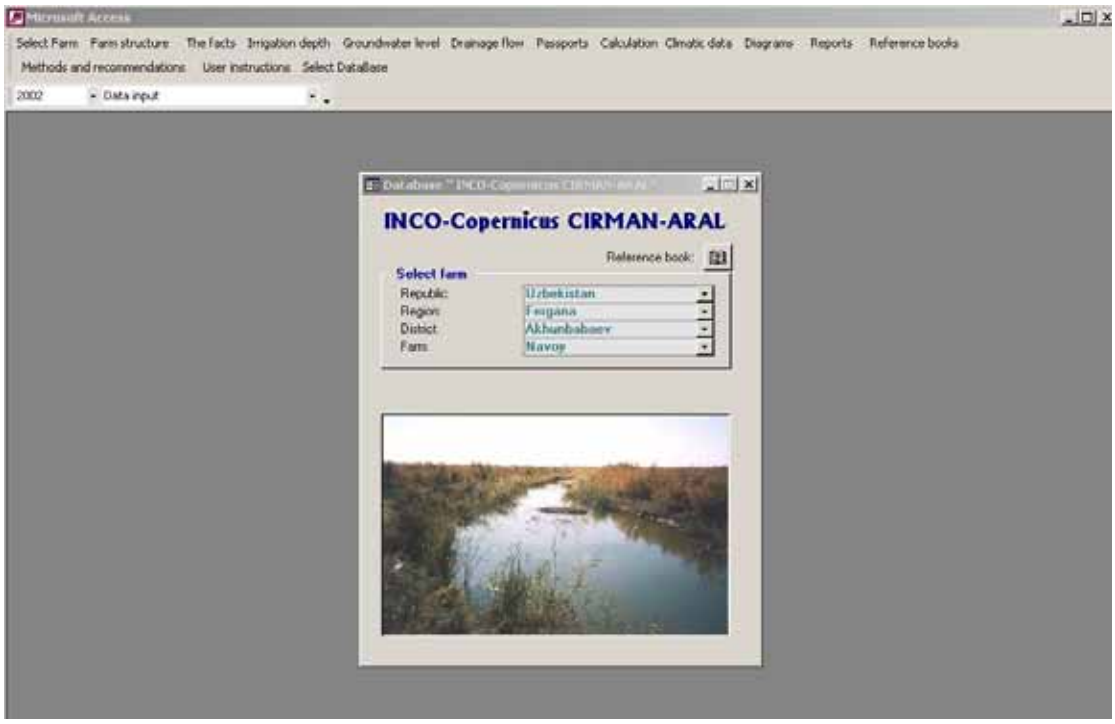


Рис. 3. Главная форма информационной системы «CIRMAN-ARAL»

Работа ведется в двух режимах: «Ввод» и «Просмотр и корректировка данных». Для расчета модели водораспределения необходимо выполнить следующие шаги:

1) Определить структуру ирригационной системы
2) Задать нормы полива
3) Запустить расчет.

Для сравнения значений «План», «Факт» и «Норма» имеются соответствующие диаграммы в подменю «Графики». На формах в правом верхнем углу находится кнопка «Справочник». При нажатии на эту кнопку появляется тот или иной справочник в зависимости от того, на какой опции установлен курсор. Например, если пользователь выбирает «Хозяйство», то при вызове справочника появится соответственно справочник хозяйств. В левом нижнем углу формы расположена кнопка «Отчет», при нажатии на которую появляется отчетная форма. Пользователь может просмотреть и вывести на печать необходимую информацию.

В программе имеются следующие справочники: потребителей, водоотводов, привязки водоотводов к потребителям, измерительных устройств, тарировочных кривых, ответственных исполнителей, исполнителей, гидромодульных районов, ординат гидромодулей, районов, ирригационных сетей.

Таблица 6. Опции меню базы данных

Суб-меню	Опции
Выбор хозяйства	
Фактические данные	
Нормы полива	
Уровень грунтовых вод	
Дренажный сток	
Паспорта	
Расчет модели	
Климатические данные	
Графики	График расходов на ГП Графики полива полей Приток в контур Расходы на каналах Сравнительные графики "Норма/План" Сравнительные графики "Факт/Норма/План"
Отчеты	Ведомости расходов воды ГП Рапорта Дренажный сток по дренам
Справочники	
Методы и рекомендации	
Инструкции для пользователя по системам	CROPWAT ISAREG GISAREG
Выбор базы данных (по году)	

«Справочник потребителей» представлен в виде простого списка, в который можно добавлять записи, изменять или удалять их. Однако удаление – операция опасная тем, что пользователь может потерять всю информацию об удаляемом потребителе. «Справочник водоотводов» также представляет собой простой список, но разделенный по типам отводов – магистральный канал, обычный канал, отвод, сброс и подпитка (рис. 4). Пользователь должен выбрать тип водовода в разворачивающемся списке, расположенном в верхней части формы, после чего будут представлены все типы. В «Справочнике привязки водоотводов к потребителям» каждому водоотводу назначается потребитель. При этом несколько водоотводов могут приходиться на одного водопотребителя. В «Справочнике измерительных устройств» определяются тип и наименование измерительных устройств. Из этого справочника имеется выход в «Справочник тарировочных кривых», в котором для каждого измерительного устройства вводятся отметки и соответствующие им расходы. В «Справочнике ординат гидромодулей» выбирается гидромодульный район, задаются соответствующие культуры и вводятся по ним ординаты. «Справочники ответственных исполнителей, исполнителей, районов, ирригационных сетей» представляют собой наборы записей, которые пользователь может добавлять, изменять или удалять. В таблице 7 дан перечень отчетов программы.

Рис.4. Отвод из ЮФК для деривационной ГЭС

Таблица 7. Перечень отчетов программного комплекса

Отчеты	Тип
Плановый	Годовой Декадный
Установленный лимит	Годовой Декадный Расчетный
Заявка	Годовой Декадный

Отчеты могут выводиться как для одного потребителя, так и для всех в зависимости. Пользователем задается период (для годового отчета) или декада (для декадного). В таблице указываются имеющиеся документы. Если они отсутствуют, то и в отчете нет данных. В нижней части формы имеются две кнопки: для просмотра и для печати отчета.

Экспериментальный участок (рис. 5) располагался в хозяйстве «Азизбек-1» Ахунбабаевского района, Ферганской области. На этот участок вода подается по каналу, который разветвляется на несколько более мелких. Каждый канал занесен в базу данных со своими параметрами. Определено 16 водовыпусков на поля. Водовыпуск подает воду на соответствующее поле (поливной участок). Для каждого поливного участка определен набор параметров. Информация, определенная для опытного участка передается в математическую модель, для расчета плана. На выходе модели рассчитанный план передается в базу данных и представляется пользователю.

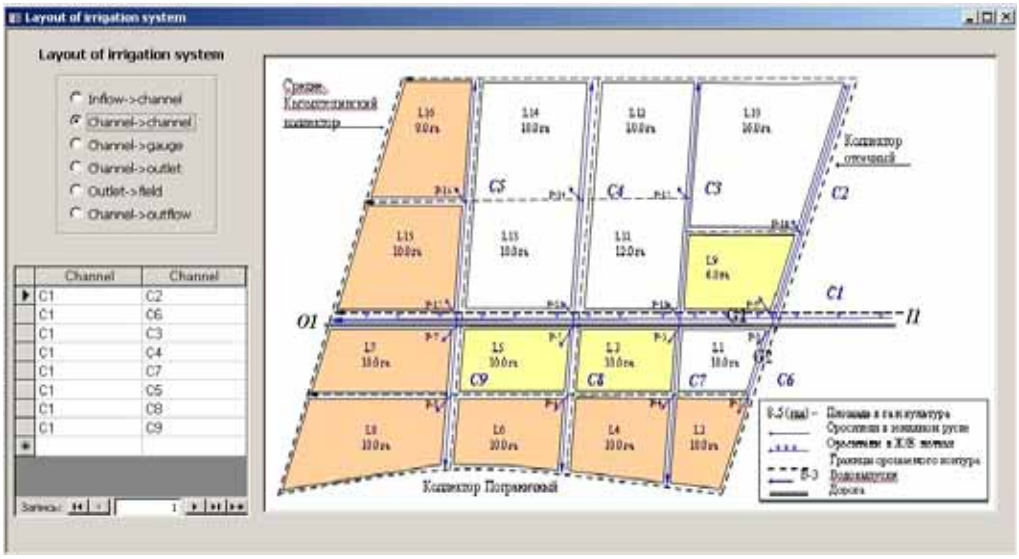


Рис.5. План-схема опытного хозяйства

Немаловажное место в системе занимает ГИС при обработке данных (рис. 6). ГИС позволяет наглядно представить информацию о полях. Представляя карту пользователю и различные слои, можно дать ему мощный инструмент для анализа. При расчетах ГИС позволяет довольно просто работать с площадными объектами, а также решать некоторые задачи, например задачу нахождения пути и др. ГИС позволяет работать с космическими снимками и с их помощью значительно уточнять информацию по структуре хозяйств.

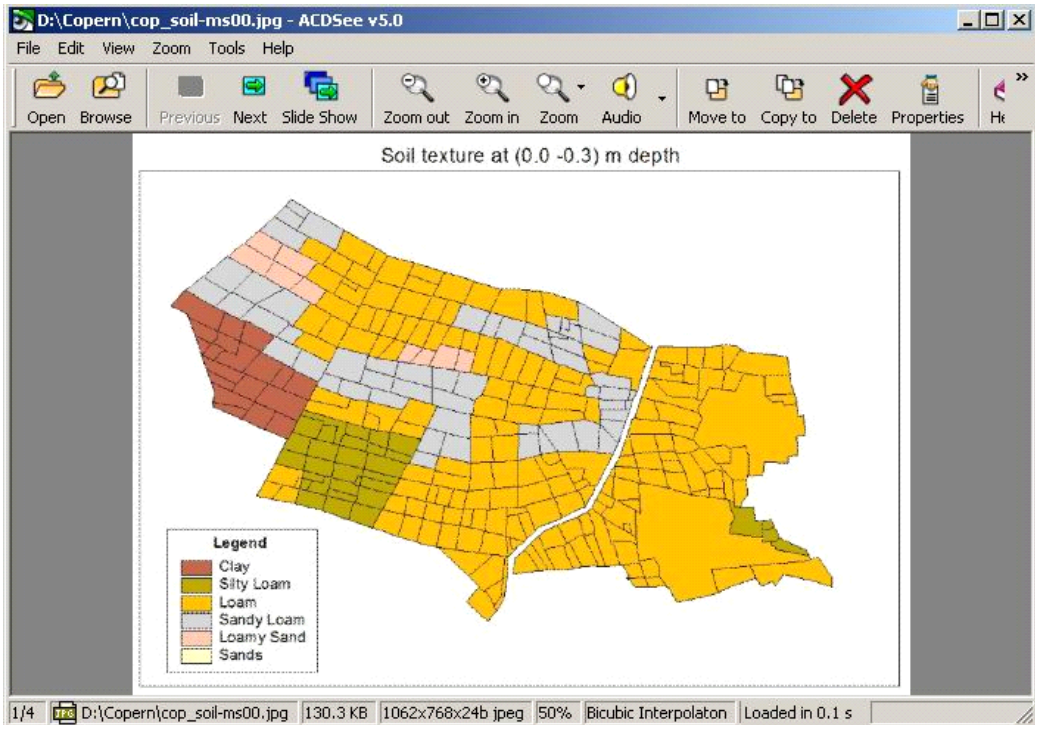


Рис. 6. Пример использования ГИС для создания карты почвенных разностей в пилотном хозяйстве

Библиография:

Dukhovny V., Sokolov V. Land and Water Information System for the Aral Sea Basin. Proceedings of the 5th International Congress on Management, Services and Technologies of Water (HYDROTOP-99). 15-17 June 1999, Marseilles - France. pp. 155-161.

Dukhovny V., Tuchin A., Sokolov V., Umarov P. Experience with Modeling for Water Resources Development in the Aral Sea Basin. The 7th International Conference of the Israel Society for Ecology and Environmental Quality Sciences on "Environmental Challenges for the Next Millennium", Jerusalem, Israel, June 13-18, 1999.

Sokolov V. Information System for Water Resources Management in the Aral Sea Basin. Proceedings of the 19th European Regional Conference of ICID "Sustainable Use of Land and Water"4-8 June 2001, Brno and Prague, Czech Republic. p. 87

Глава 5.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОРОШЕНИЯ

А.Е. Платонов[8], Б. Винсент[9]

Реферат: Серии декадных (10-дневных) растровых слоев NDVI спутниковых снимков SPOT Vegetation за 1999 – 2002 г.г. использованы для: классификации землепользования, в основном для уточнения границ орошаемых площадей; анализа декадных изменений средних значений NDVI для различных единиц агрегирования (зон орошения Ферганской Долины, административных районов Ферганской области, и коллективных хозяйств Кувинского района). Дополнительно использовались два спутниковых снимка Landsat-7 ETM+ на 28/04/2001 и 02/08/2001 для: классификации основных сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы и хлопка), на основе анализа значений NDVI; распознавания засоления почв путем расчета индекса неравномерности значений NDVI (коэффициента вариации) в пределах каждого орошаемого поля двух выбранных участков. Совместное использование снимков с обоих спутников (SPOT Vegetation и Landsat-7), вместе со слоем полигонов ГИС орошаемых полей, применено для модели-

[8] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, г. Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11, E-mail: a.platonov@mail.ru.

[9] CEMAGREF, Antony,France, E-mail: bernard.vincent@cemagref.fr.

рования декадных значений коэффициентов сельскохозяйственных культур (Kc) из значений NDVI. Результаты моделирования могут использоваться для корректировки с учетом местных условий значений Kc, рекомендованных в руководстве по расчету потребности сельскохозяйственных культур в воде (FAO-56), как альтернатива другим методикам, использованным в этом проекте.

Ключевые слова: спутниковое зондирование Земли, продукты SPOT Vegetation, Спутниковые снимки Landsat-7 ETM+, индекс нормализованного различия растительности NDVI, классификация сельскохозяйственных культур, распознавание засоления почв, моделирование коэффициентов сельхозкультур.

Введение

Использование спутниковых снимков для управления земельными и водными ресурсами стало технически возможным, начиная с конца семидесятых годов прошлого века. Мультиспектральные снимки низкого пространственного разрешения (1100 м) со спутников NOAA AVHRR использовались для классификации землепользования/покрытия земли и при мониторинге процессов орошения и дренажа как на больших (Bastiaanssen, 1998), так и маленьких площадях (Chemin *et al.*, 2004).

Недавно (в 2000 г.) запущенный спутник TERRA с сенсором MODIS имеет улучшенное спектральное (36 каналов) и пространственное (250 м – 1000 м) разрешение, и дает новые возможности для дальнейших исследований (Gitelson and Kaufman, 1998; Milne и Cohen, 1999; Zhan *et al.*, 2002). 4-х канальные снимки спутника SPOT Vegetation (с 1998 г.) и результаты их обработки (NDVI, DMP) покрывают большие территории и имеют пространственное и временное разрешение 1000 м и 10 дней, соответственно. Эти снимки используются для наблюдения за сельхозкультурами и прогноза урожайности (Eerens *et al.*, 2001). Основным достоинством снимков низкого пространственного разрешения является их высокое временное разрешение, то есть возможность получения снимков исследуемой территории с помощью Internet даже дважды за день (для MODIS) и бесплатно.

Снимки, полученные серией спутников Landsat с различными сенсорами (MSS, TM, ETM+) используются очень широко. Пространственное разрешение этих мультиспектральных снимков варьируется от (56 м*89 м) для MSS до 28,5 м для сенсоров TM и ETM+. Временное разрешение - 16 дней, но учитывая присутствие облачности, обычно доступны 3-4 безоблачных спутниковых снимка за год. Снимки Landsat являются основным источником для исследований на уровнях от регионального и до поля и для различных задач (Bastiaanssen, 1998; Vincent *et al.*, 1996; Metternicht and Zinck, 2003).

Кроме Landsat, есть и другие источники спутниковых снимков: из Франции (SPOT HRV), Индии (IRS LISS), России (РЕСУРС), но их стоимость значительно выше, чем Landsat. Более приемлемы по цене снимки сенсора ASTER, расположенного на том же спутнике (TERRA), на котором расположен сенсор MODIS. Мультиспектральные (15 каналов) снимки ASTER имеют пространственное разрешение от 15 до 60 м. Снимки сенсора ALI спутника EO-1 является следующим поколением данных спутников типа Landsat, с улучшенным спектральным разрешением (9 каналов).

Мультиспектральные снимки высокого простанственного разрешения (0.6 м – 4 м) доступны со спутников IKONOS (4 канала) и Quickbird (4 канала), и их цены также очень высоки. Эти снимки могут эффективно использоваться для тщательного ведения сельхозпроизводства (Staenz and Williams, 1997; Pacheco *et al.*, 2001).

Снимки сенсора Hyperion со спутника EO-1 являются первыми гиперспектральными (220 каналов) данными из космоса. Снимки имеют пространственное разрешение 30 м и являются отличным источником данных для распознавания засоления почв (Metternicht and Zinck, 2003) и других задач (McNairn *et al.*, 2001).

Данные радаров (JERS SAR и Radarsat) являются семейством активных спутниковых сенсоров. Благодаря своей способности проникать сквозь облачность, радарные снимки обычно используютя в тропиках или в других ситуациях, связанных с наличием облачности. Снимки также используются для анализа пространственного распределения влажности почвы на небольшой глубине.

Исходные данные

Для целей исследования использовались декадные (10 дней) продукты снимков SPOT Vegetation – растровые слои индекса состояния растительности (NDVI) за 1999, 2000, 2001 и 2002 годы; а также два мультиспектральных снимка Landsat-7 ETM+ на 28/04/2001 и 02/08/2001.

Для пространственного анализа использовались следующие слои ГИС:

- Основные зоны орошения узбекской части Ферганской долины;
- Административные районы Ферганской области Узбекистана;
- Коллективные хозяйства Кувинского района Ферганской области;
- Поля орошения одного коллективного хозяйства Кувинского района Ферганской области;
- Поля орошения трех коллективных хозяйств Ахунбабаевского района Ферганской области.

Имеющиеся в наличии спутниковые снимки использовались для исследований в следующих направлениях:

1. Классификации землепользования на основе декадных (10 дней) профилей SPOT Vegetation NDVI.

2. Анализа декадных значений SPOT Vegetation NDVI, средних по различным единицам агрегирования (зонам орошения, административным районам, коллективным хозяйствам) для интервала лет с 1999 по 2002.
3. Классификации основных культур (хлопчатника, озимой пшеницы) на основе средних значений NDVI для каждого орошаемого поля по двум снимкам Landsat-7 ETM+ за 2001 год.
4. Распознавание засоления почв путем анализа индекса неравномерности значения NDVI для каждого орошаемого поля.
5. Моделирование декадных значений коэффициентов (Kc) основных культур из значений NDVI по каждому орошаемому полю.

Классификация землепользования

Из каждого декадного снимка SPOT Vegetation NDVI для интервала лет с 1999 по 2002, был вырезана территория Ферганской долины, и декадные растровые слои для каждого года были объединены в один снимок. В результате получены четыре (для каждого года) 36-канальных снимка (каждый канал содержит значения NDVI на одну декаду).

Затем по каждому 36-канальному снимку декадных NDVI была выполнена неконтролируемая классификация (с назначением 12 классов). Результаты классификации для 2002 года показаны на рис. 1.

Профили декадных значений NDVI для типичных пикселей в пределах темно-зеленых областей (имеющих хорошее состояние растительности), и пикселя с голой почвы в период вегетации, показаны на рис. 2. Два пика на временном профиле NDVI для орошаемых площадей соответствуют двум основным культурам (озимой пшенице и хлопчатнику), культивируемым на исследуемой площади. В марте, основном сезоне дождей, пик NDVI для неорошаемой территории связан с наличием богарных пастбищ.

Так как для проведения полной классификациии землепользования не было доступных наземных данных, полученные результаты были в основном использованы для уточнения слоя ГИС границ зон орошения Ферганской долины.

Анализ декадных значений SPOT Vegetation NDVI

Пространственным наложением полигонов слоев ГИС зон орошения Ферганской долины, административных районов Ферганской области и коллективных хозяйств Кувинского района на растровые слои SPOT Vegetation NDVI вычислены средние значения NDVI по различным единицам агрегирования для каждой декады 1999-2002 годов. Для анализа использовались оригинальные значения пикселей SPOT Vegetation NDVI, находящиеся в интервале (0-255). Временные профили средних значений NDVI для основных зон орошения Ферганской долины (для 1999-2002 годов) показаны на рис. 3.

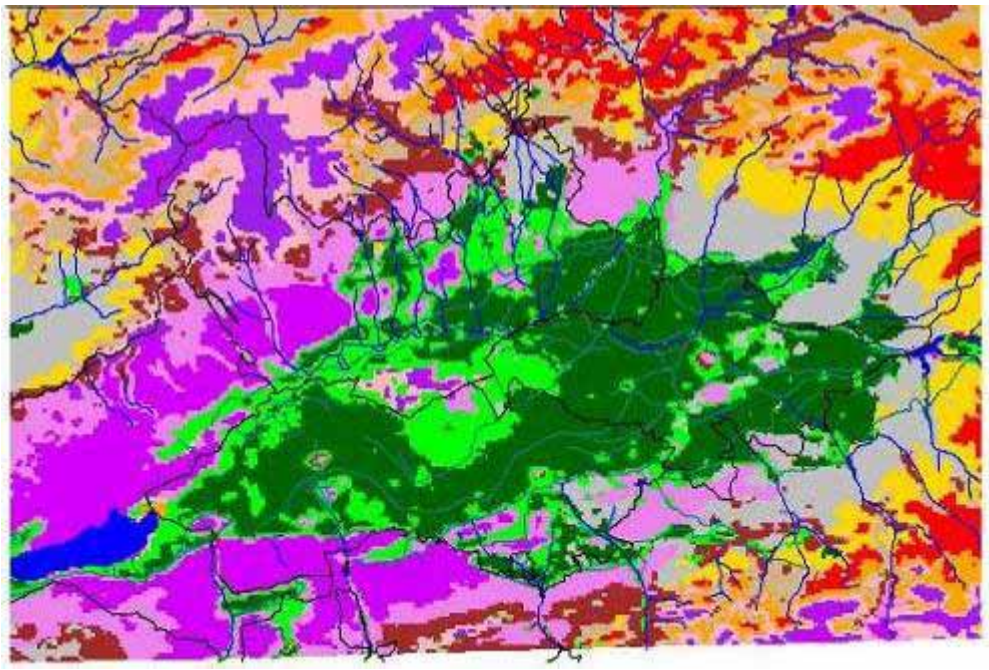


Рис. 1. Результат классификации землепользования для Ферганской долины на 2002 г.

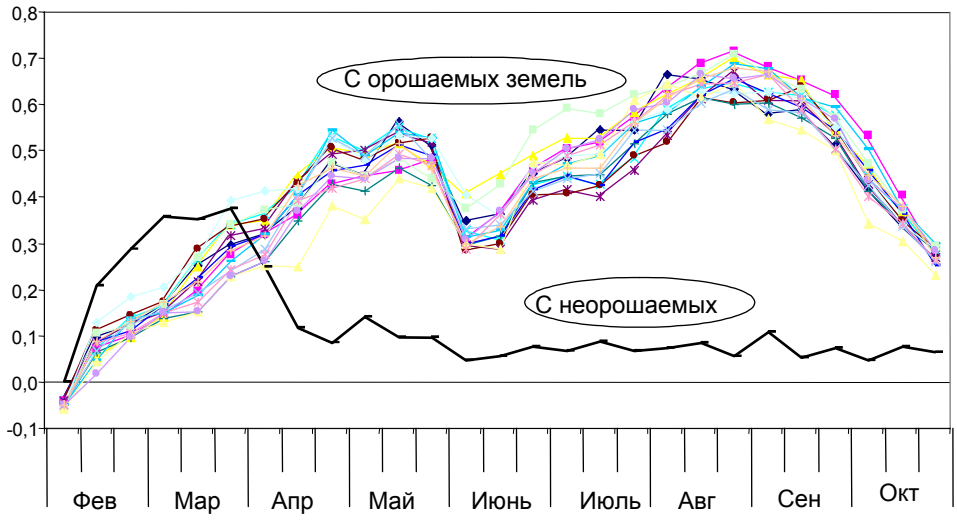


Рис. 2. Декадные значения NDVI для пикселей из орошаемых
и неорошаемых земель Ферганской долины

Временные профили средних значений NDVI для административных районов Ферганской области на 2002 год показаны на рис. 4. Такие же профили для некоторых коллективных хозяйств Кувинского района Ферганской области на 2002 год представлены на рис. 5.

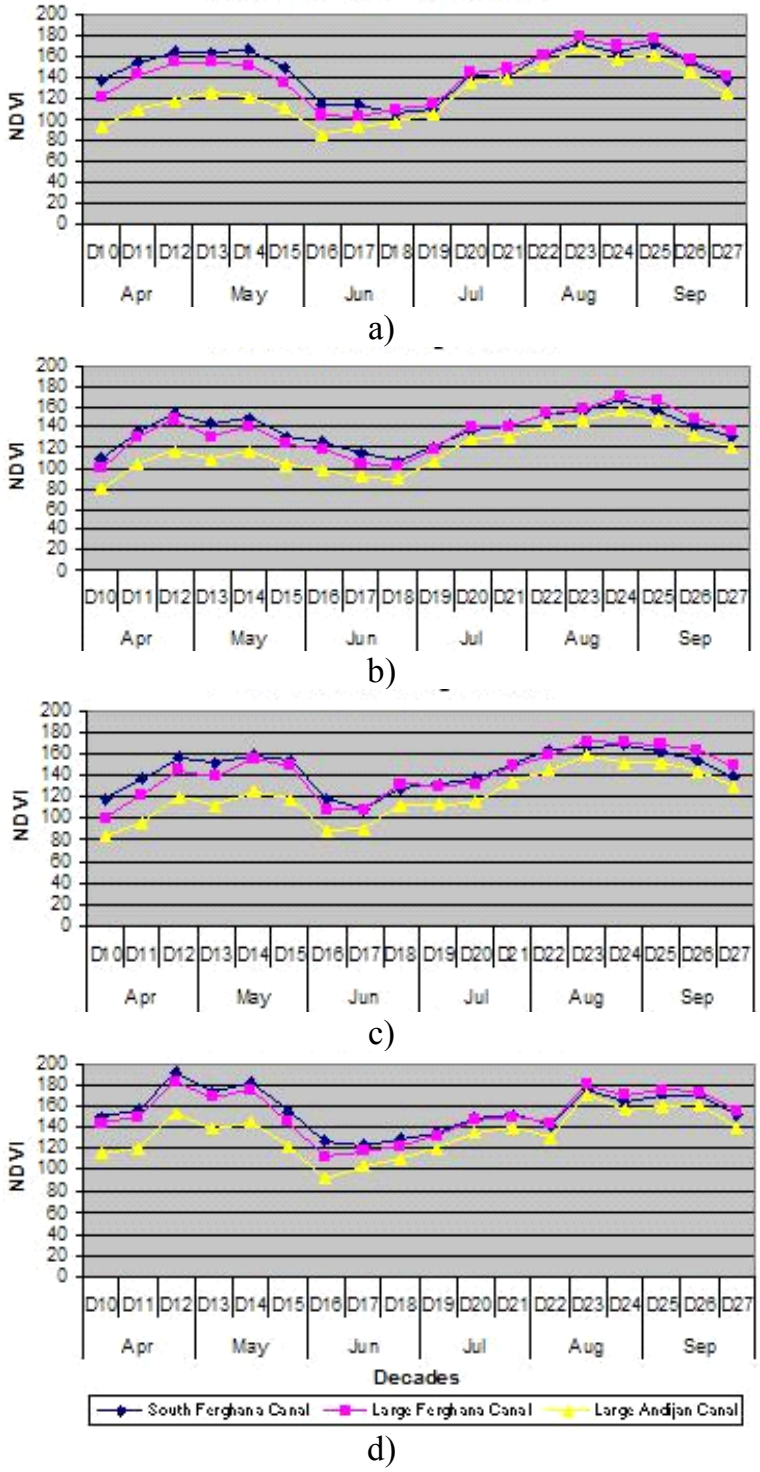


Рис. 3. Декадные значения NDVI для основных зон орошения Ферганской долины:
a) 1999, b) 2000, c) 2001 d) 2002

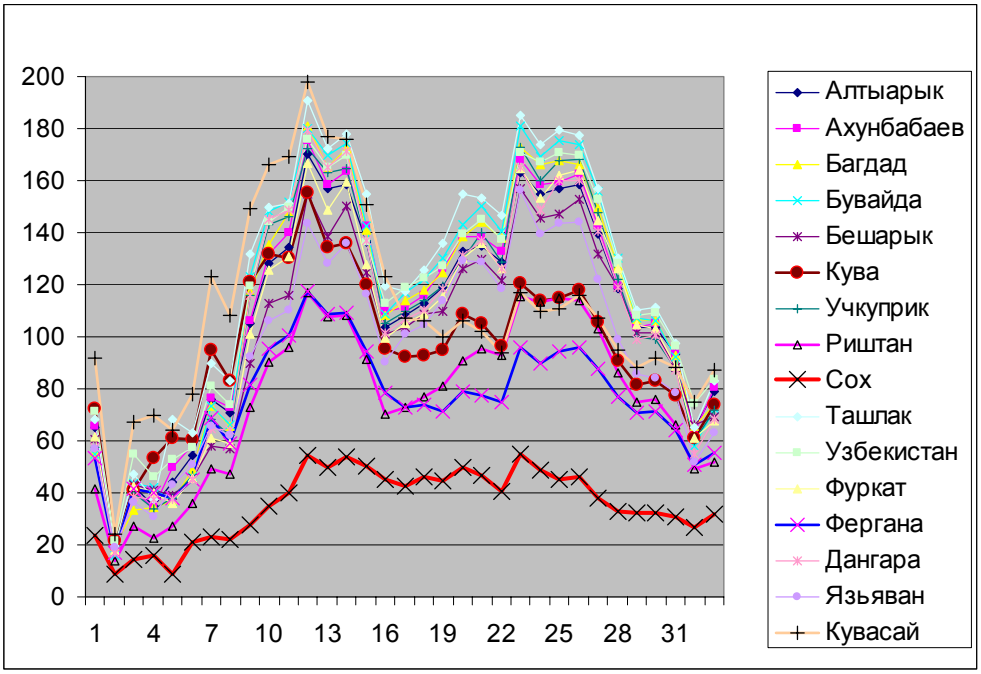


Рис. 4. Декадные значения NDVI на 2002 год
для административных районов Ферганской области

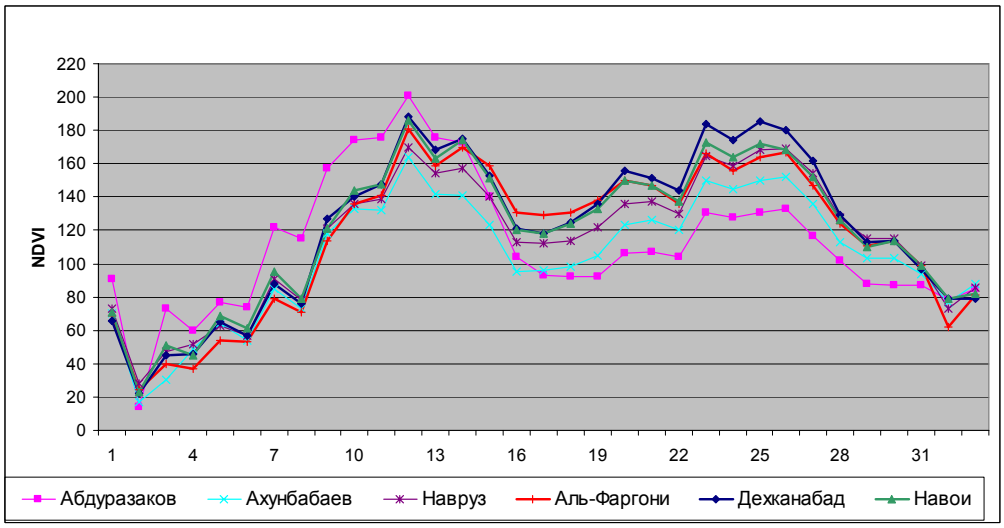


Рис. 5. Декадные значения NDVI на 2002 год
для коллективных хозяйств Кувинского района

Результаты обработки снимков SPOT Vegetation NDVI показывают, что для разных единиц площади (пикселей, зон орошения основных оросительных каналов, административных районов и коллективных хозяйств) декадный профиль NDVI различен, причина этого в разной продуктивности земли, пространственной и временной неоднородности доступности воды

на орошение и пр. Для анализа причин, влияющих на декадное состояние растительности необходимо продолжить дальнейшие исследования.

Полученные результаты могут использоваться лицами, принимающими решения на региональном уровне для локализации мест, с градацией состояния растительности (регулярно высокие, средние и низкие значения NDVI) с целью более эффективного управления водными и земельными ресурсами, особенно в условиях дефицита воды на орошение.

Классификация основных культур

Известно, что значения индекса нормализованного различия растительности (NDVI) являются количественной мерой состояния растительности. Для снимков Landsat значения NDVI вычисляются по следующей формуле:

$$NDVI = (Band4 - Band3) / (Band4 + Band3) \qquad [1]$$

где: Band4 и Band3 – номера разрядов (значения пикселей) в инфра-красном (Band4) и красном (Band3) каналах снимка.

Пространственным наложением слоя ГИС полигонов орошаемых полей на созданные растровые слои NDVI на основе двух снимков Landsat-7 ETM расчитаны средние значения NDVI на две даты для каждого орошаемого поля территории проекта. Вычисленные значения NDVI занесены в два поля (NDVI_0428 and NDVI_0802) таблицы отличительных черт слоя ГИС полигонов орошаемых полей.

Для всех записей таблицы отличительных черт были последовательно применены четыре пространственных фильтра с использованием правил принятия решения, показанных на рис. 6. Для выбранных записей по каждому фильтру были занесены значения в созданное поле отличительных черт (C2001) – код основной сельхозкультуры (“B”- голая почва в течение года; “C” – хлопчатник; “WM” – кукуруза после озимой пшеницы; “W” – озимая пшеница).

Важным этапом является выбор порогового значения NDVI при наличии растительности, после нескольких итераций было выбрано значение NDVI, около 0,2.

Все полигоны населенных пунктов были классифицированы как “WM”, для их выделения в отдельный класс требуется визуальный анализ пикселей снимков Landsat-7 в пределах полигонов слоя ГИС. Населенные пункты очень четко выделяются при визуальной интерпретации, и для каждого полигона населенного пунта было назначено значение в новом атрибутном поле (LUC) – код землепользования.

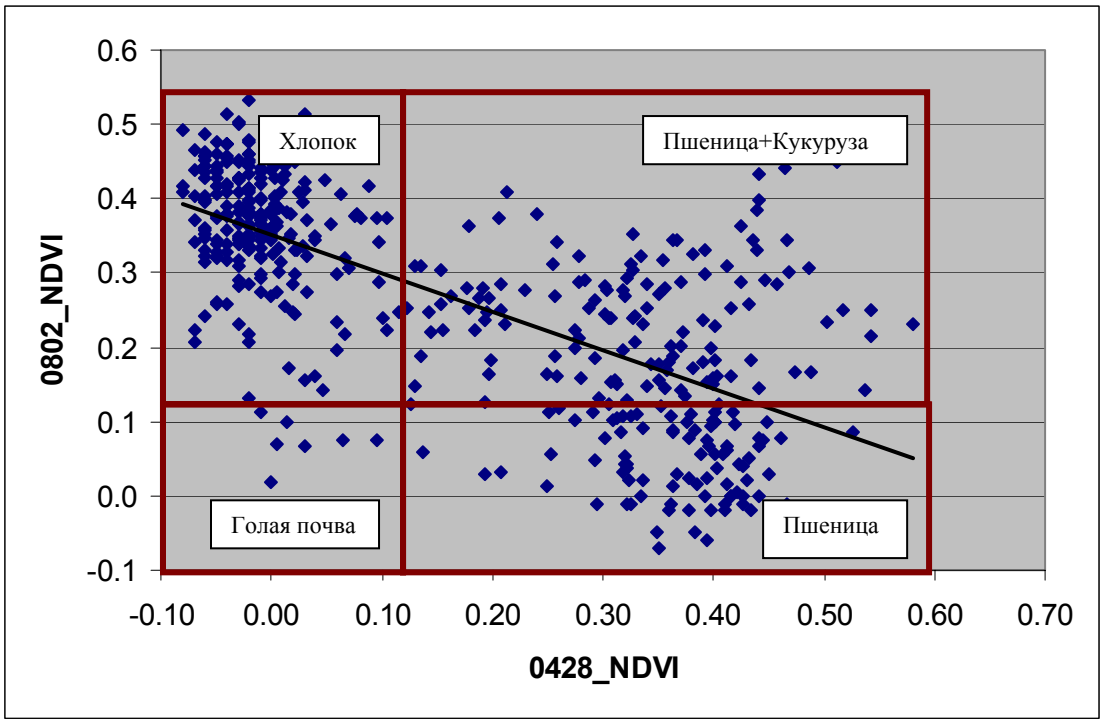


Рис. 6. Правила принятия решений для классификации основных сельхозкультур

На рис. 7 показан результат классификации основных сельхозкультур для каждого орошаемого поля територии проекта. К сожалению, надежные наземные данные для оценки точности проведенной классификации основных сельхозкультур отсутствовали. Были доступны только данные о структуре посевов для 16 орошаемых полей фермерского хозяйства «Азизбек-1» и они полностью соответствуют результатам классификации основных культур по спутниковым снимкам (100 %-точность).

Распознавание засоления почв

Существуют различные методы распознавания засоления почв по спутниковым снимкам. Типичный метод основан на анализе значений пикселей в различных спектральных каналах снимка. Но точность распознавания очень зависит от размера пятен засоления почв, находящихся в пределах каждого орошаемого поля. Учитывая пространственное разрешение мультиспектральных снимков Landsat-7 (30 м*30 м или 0,09 га), при размере пятен засоления почв, меньше, чем размер пикселя, распознать засоление невозможно. Единственный путь решения этой проблемы – использование снимков с высоким пространственным разрешением, выполненных с таких спутников, как: IRS, IKONOS или QuickBird.

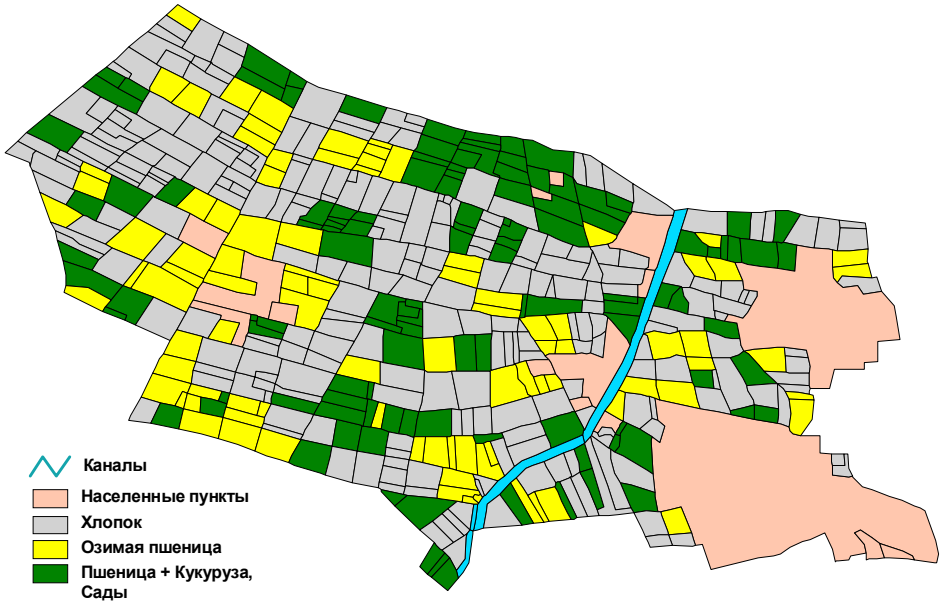


Рис. 7. Результаты классификации основных сельхозкультур по территории проекта

Ферганская долина не лучшая территория для распознавания засоления, так как не содержит больших площадей, подверженных засолению, особенно с солевой коркой на поверхности почвы, это подтвердилось в течении рекогносцировочного наземного обследования. Были обнаружены только несколько мест в Кувинском районе, имеющие проблемы с засолением почв. Вот почему было принято решение использовать две территории для сравнительного исследования по засолению почв: зону проекта в Ахунбабаевском районе и тестовую зону в Кувинском районе.

Распознавание засоления почв, использованное при исследовании, основано на анализе пространственной неравномерности покрытия растительностью каждого орошаемого поля. При этом было сделано предположение, что основной причиной пространственной неоднородности NDVI на орошаемых полях является засоления почв. Очевидно, что возможны и другие причины неоднородности состояния растительности, такие как: нехватка оросительной воды, плохая планировка полей, отсутствие удобрений, и прочие причины. Фактически, обработкой спутниковых снимков лишь для одного года невозможно распознать причины пространственной неоднородности NDVI. Это достижимо только при анализе сезонных спутниковых снимков за ряд лет (2-3 года), путем создания пространственного фильтра для выделения орошаемых полей, с регулярно высокой неоднородностью состояния растительности (NDVI).

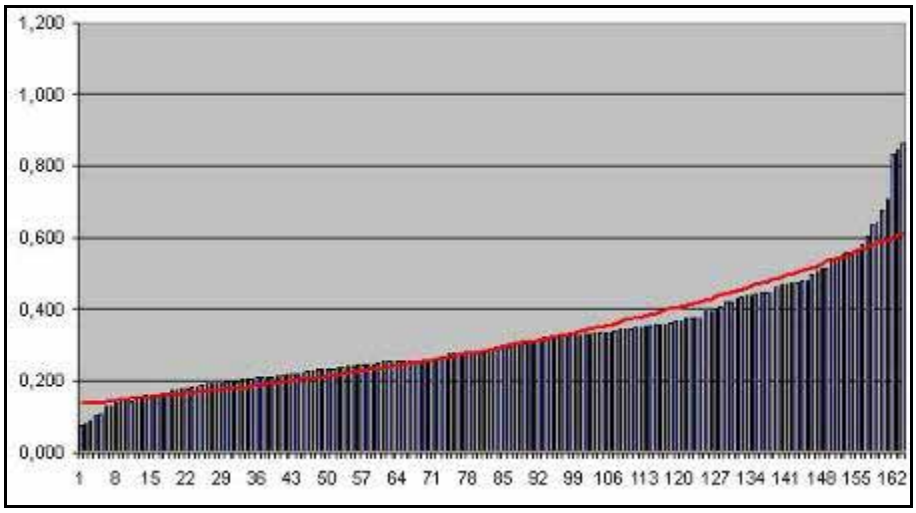
На рис. 8 показаны результаты частотного анализа индекса неоднородности NDVI на 28/04/2001 для зоны проекта в Ахунбабаевском районе и

тестовой зоны в Кувинском районе. Полученные уравнения зависимости, соответственно:

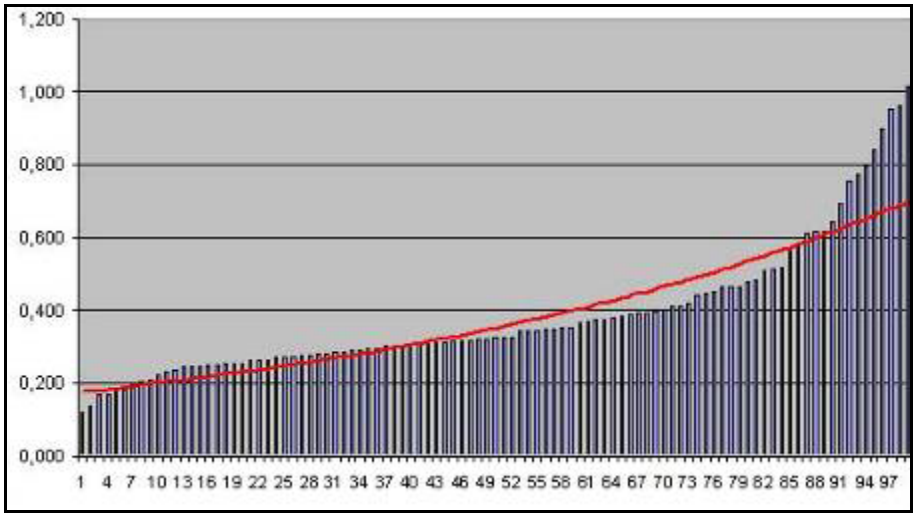
$$y = 0{,}1352\ e^{0{,}0092\,x} \quad \text{с } R^2 = 0{,}9398,$$

$$y = 0{,}1748\ e^{0{,}014\,x} \quad \text{с } R^2 = 0{,}908,$$

указывают на хорошее совпадение данных.



a)



b)

Рис. 8. Частотный анализ индексов неоднородности NDVI для:
a) зоны Ахунбабаевского района и b) тестовой зоны Кувинского района

В сравнении с зоной проекта в Ахунбабаевском районе, тестовая зона в Кувинском районе содержит большее количество орошаемых полей с высокими значениями индекса неоднородности (HI) растительности (между 0,6 и 1,0), это может быть связано со свойствами почв, в частности, с засолением.

Однако, для проверки пространственной стабильности вычисленных индексов неоднородности состояния растительности для различных лет и сезонов, необходимо использование спутниковых снимков Landsat-7 для исследуемых зон за ряд лет. Орошаемые поля с регулярно высокими значениями HI и низкими NDVI являются первоочередными кандидатами на сбор детальных наземных данных с измерениями и оценками степени засоления почв.

Корелляция между значениями индекса равномерности растительности (HI) и состояния растительности (NDVI), средних по каждому орошаемому полю, может использоваться как показатель продуктивности использования орошаемых земель (рис. 9). В правой стороне графика расположены орошаемые поля с высокими значениями NDVI и низкой неоднородностью растительности (сельхозкультуры в хорошем состоянии), а в левой части можно видеть поля с низкими значениями NDVI и высокой неоднородностью растительности (т. е. необходимы меры по улучшению ситуации).

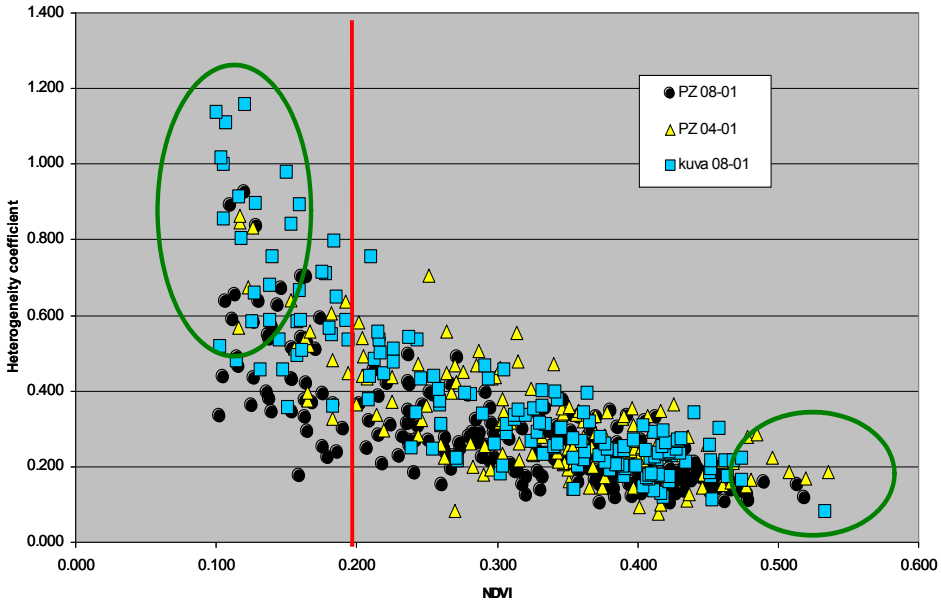


Рис. 9. Значения индекса неравномерности (HI)
и состояния растительности (NDVI) для орошаемых полей

Моделирование декадных значений коэффициентов (Kc) основных сельхозкультур

Так как пиксели снимков SPOT Vegetation покрывают «на земле» площадь в 100 га, а обычный размер орошаемого поля от 4 до 10 га, в пределах орошаемых площадей Ферганской Долины невозможно найти «чистый» пиксель, представленный только одной сельхозкультурой. Таким образом, при использовании снимков SPOT Vegetation всегда приходится

иметь дело со «смешанными» пикселями, содержащими информацию как о растительности, так и о голой почве.

Для моделирования декадных значений коэффициентов (Kc) основных сельхозкультур, необходимо использование данных из трех источников:

1. Декадные снимки SPOT Vegetation NDVI;
2. Снимки Landsat-7 ETM+, на даты максимума развития растительности основных сельхозкультур (в нашем случае: озимой пшеницы и хлопчатника); и
3. Слой ГИС полигонов орошаемых полей.

На первом этапе был выполнен анализ соответствия спутниковых данных из этих источников, так как планировалось одновременно использовать данные разных сенсоров с различным пространственным разрешением. Для этого был проведен анализ корелляции между деградированными (до 600 м) значениями NDVI исходных снимков Landsat-7 (30 м) и вычисленными средневзвешенными значениями NDVI для каждого орошаемого поля, находящегося в пределах деградированного пикселя.

Границы деградированных пикселей Landsat-7 (красные линии) и тематический растровый слой градаций NDVI, полученный на основе снимка Landsat-7 показан на рис. 10.

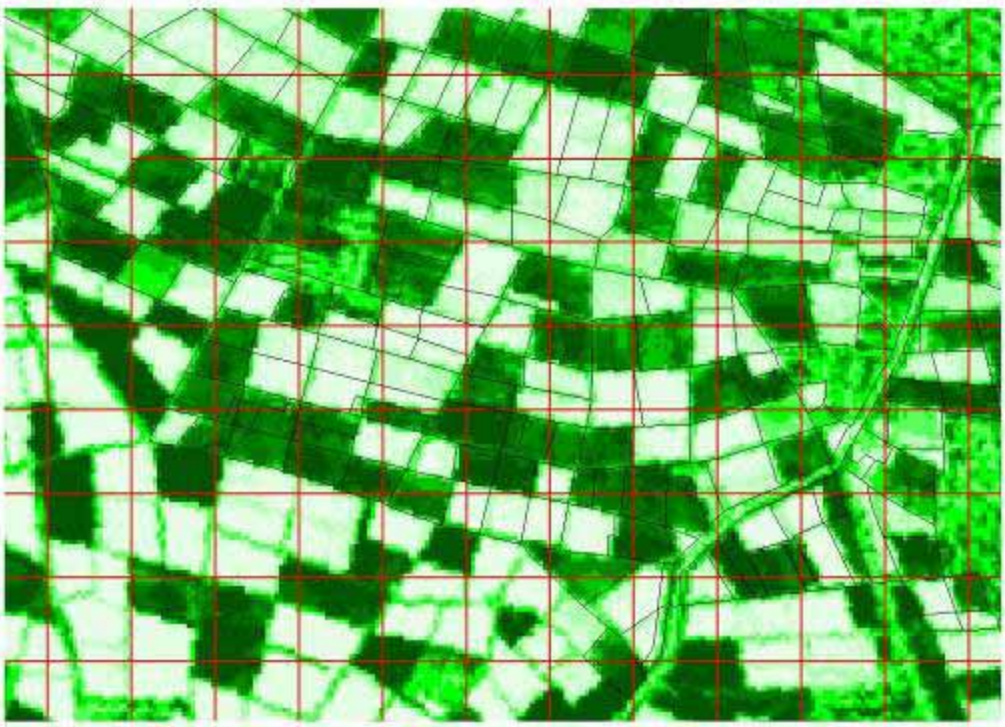


Рис. 10. Тематический слой градаций NDVI по снимку Landsat с границами пикселей, деградированных до 600 м

Хорошая корелляционная связь между значениями деградированных пикселей (600 м) и вычисленными средневзвешенными значениями NDVI для орошаемых полей, в пределах каждого деградированного пикселя была

получена на обе даты спутниковых снимков Landsat-7: 28/04/2001 (рис. 11a) и 02/08/2001 (рис. 11b). Соответствующие уравнения регрессии:

$$y = 0{,}7788\ x + 0{,}0516 \qquad \text{с } R^2 = 0{,}9413,$$

$$y = 0{,}8697\ x + 0{,}0345 \qquad \text{с } R^2 = 0{,}9454.$$

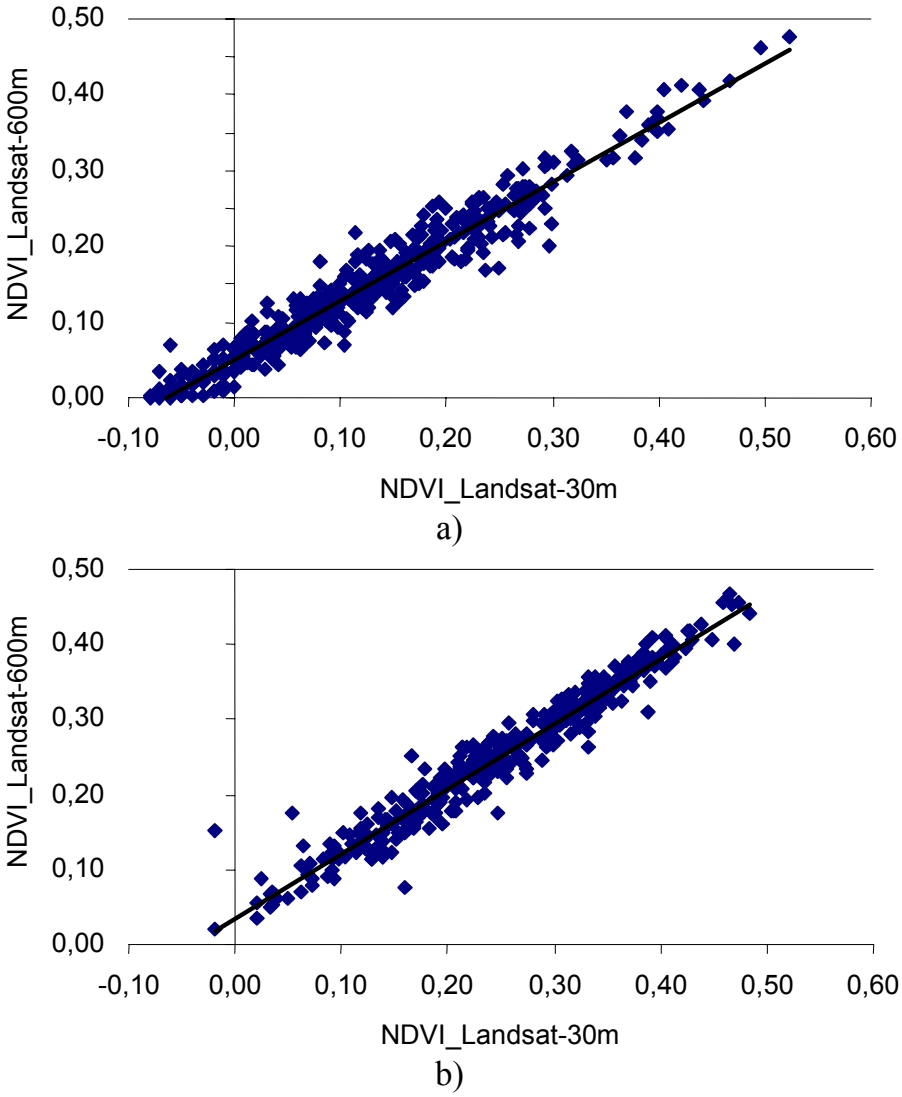


Рис. 11. Корелляция между значениями деградированных пикселей (600 м) и вычисленными средневзвешенными значениями NDVI по снимкам Landsat (30 м) на a) 28/04/2001 и b) 02/08/2001

Подобный корелляционный анализ был выполнен между средневзвешенными значениями NDVI по снимкам Landsat-7 (на 28/04/2001 и 02/08/2001), для частей орошаемых полей, находящимся в пределах каждого пикселя SPOT Vegetation и значениями NDVI по снимкам SPOT Vegetation на 12-ю и 22-ю декады 2001 г., соответственно. Наилучшая ко-

релляция выявлена для орошаемых полей, классифицированные как “Пшеница+Кукуруза” на Август, 2001 (рис. 12), с уравнением:

$$y = 0{,}8801\ x + 0{,}0397 \qquad \text{с } R^2 = 0{,}8568.$$

Кроме этого, при анализе отдельных пикселей с плохим состоянием растительности, было выявлено, что сенсор SPOT Vegetation более чувствителен к присутствию растительности, чем сенсор Landsat-7 ETM.

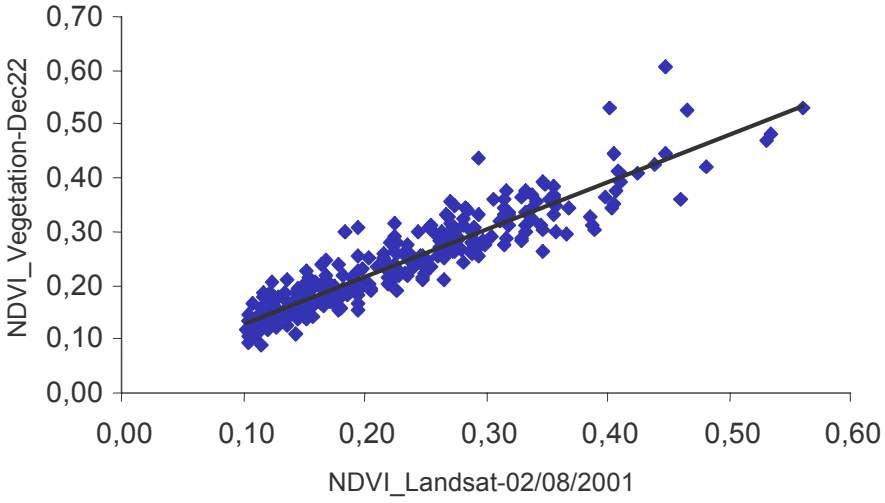


Рис. 12. Корелляция между значениями пикселей SPOT Vegetation (1000 м) на 22-ю декаду 2001 г. и вычисленными средневзвешенными значениями NDVI по снимкам Landsat (30 м) на 02/08/2001

На основе растровых слоев SPOT Vegetation NDVI был создан векторный слой ГИС, каждый полигон которого сответствовал пикселю NDVI и в созданные поля отличительных черт занесены декадные значения NDVI для каждого полигона. Пространственным наложением этого слоя ГИС на слой ГИС орошаемых полей создан новый слой ГИС, в котором полигоны орошаемых полей были поделены на части при пересечении с полигонами границ пикселей SPOT Vegetation NDVI.

Для моделирования декадных значений NDVI по каждому орошаемому полю использовано допущение, что пропорция полей с растительностью и голой почвой в пределах каждого пикселя SPOT Vegetation NDVI по состоянию на 28/04/2001 является репрезентативной для декад с номерами от 7 до 16, и эта пропорция по состоянию на 02/08/2001 репрезентативна для декад с 17 по 30. Таким образом, на основе пропорции площадей частей орошаемых полей, находящихся в пределах каждого полигона пикселей SPOT Vegetation и их значений NDVI, вычисленных из обоих снимков Landsat-7 ETM, были расчитаны декадные значения NDVI для каждой части орошаемых полей. После этого, средневзвешенные значения NDVI рассчитаны для каждого орошаемого поля, на основе значений NDVI его частей по всем декадам. Статистические результаты моделирования декадных значений NDVI для 206 орошаемых полей, классифицированных как

«Пшеница» показаны на рис. 13, то же для 670 полей «Хлопчатник» показаны на рис. 14.

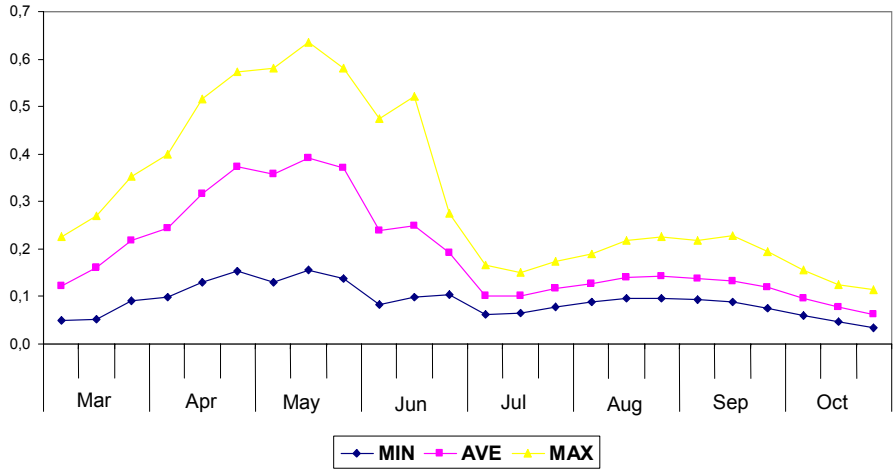


Рис. 13. Статистика моделированных декадных значений NDVI для полей «Пшеница»

Известно, что существует сильная корелляционная связь между значениями NDVI из снимков Landsat-7 ETM и значениями коэффициентов сельскохозяйственных культур (Kc). В публикации FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) рекомендовано использование максимального значения Kc, равного 1,2, для озимой пшеницы и хлопчатника. На основе этого, в первом приближении, декадные значения коэффициентов основных культур были расчитаны из моделированных значений NDVI с использованием простой формулы:

$$Kc = 2 * \mathrm{NDVI} \qquad [2]$$

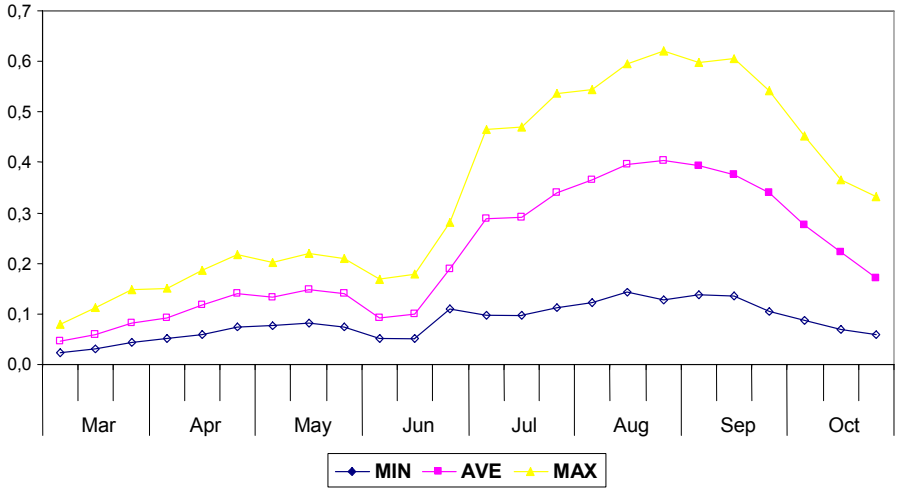


Рис. 14. Статистика моделированных декадных значений NDVI для полей «Хлопчатник»

Моделированные на основе данных спутникового зондирования Земли декадные коэффициенты (Kc) основных сельхозкультур могут использоваться для корректировки рекомендованных ФАО значений Kc, при уточнении применительно к местным условиям (рис. 15). В дальнейшем результаты моделирования декадных значений Kc по спутниковым снимкам необходимо проверить для различных лет и других местоположений объектов.

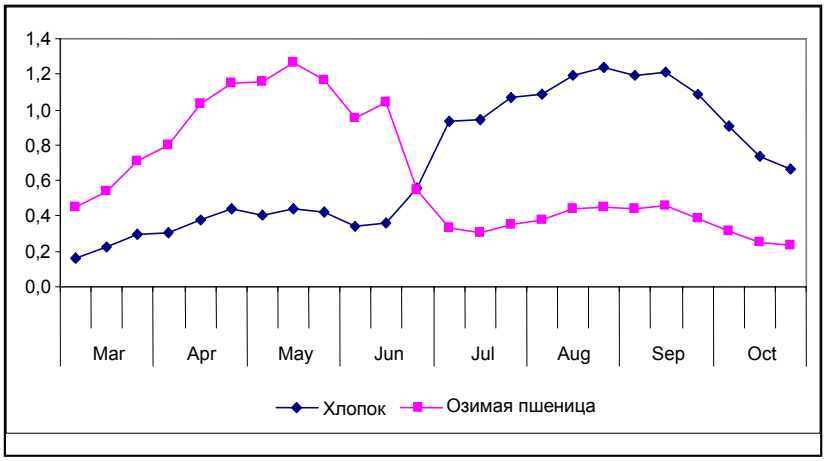


Рис. 15. Максимальные декадные значения K_c для основных сельхозкультур, моделированные с использованием спутниковых снимков

Выводы

Метод классификации основных сельхозкультур на основе анализа значений NDVI, вычисленных с использованием мультиспектральных спутниковых снимков Landsat-7 ETM, показал довольно хорошие результаты.

Предварительные результаты распознавания засоления почв путем анализа индекса равномерности растительности по каждому орошаемому полю могут быть улучшены при использовании сезонных снимков Landsat за ряд лет. Гипер-спектральные, а также улучшенного пространственного разрешения мульти-спектральные спутниковые снимки позволят значительно повысить точность распознавания засоления почв.

Совместное использование снимков низкого пространственного, но высокого временного разрешения (SPOT Vegetation NDVI), и снимков высокого пространственного, но низкого временного разрешения (Landsat-7 ETM), вместе со слоем ГИС полигонов орошаемых полей, дает возможность моделировать декадные значения коэффициентов основных сельхозкультур (Kc) на основе значений NDVI. Проверенные значения Kc могут использоваться для моделирования в среде ГИС фактической потребности сельскохозяйственных культур в воде, как для отдельных полей орошения, так и для любой исследуемой площади.

Библиография

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Rome, 300 pp.

Bastiaanssen, W.G.M., 1998. Remote Sensing in Water Resources Management: The state of the art. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

Chemin, Y., Platonov, A., Abdullaev, I., Ul-Hassan, M., 2004. Supplementing farm level water productivity assessment by Remote Sensing in transition economies. Agricultural Water Management (in press).

Eerens, H., Kempeneers, P., Piccard, I., Verheijen, Y., 2001. Crop monitoring and yield forecasting with NOAA-AVHRR or SPOT-Vegetation. Remote Sensing of Environment 75: 15 – 20.

Gitelson, A., Kaufman, J., 1998. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series—spectral consideration. Remote Sensing of Environment 66: 343–350.

McNairn, H., Deguise, J.C., Pacheco, A., Shang, J., Rabe, N., 2001. Estimation of crop cover and chlorophyll from hyper-spectral Remote Sensing. 23rd Canadian Remote Sensing Symposium, Sainte-Foy, Québec, Canada.

Metternicht, G.I., Zinck J.A., 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. Remote Sensing of Environment 85: 1 – 20.

Milne, B.T., Cohen, W.B., 1999. Multi-scale assessment of binary and continuous landcover variables for MODIS validation, mapping, and modeling applications. Remote Sensing of Environment 70: 82 – 98.

Pacheco, A., Bannari, A., Deguise, J., McNairn, H., Staenz K., 2001. Application of Hyperspectral Remote Sensing for LAI Estimation in Precision Farming. 23rd Canadian Remote Sensing Symposium, Sainte-Foy, Québec, Canada.

Staenz, K., Williams, D.J., 1997. Retrieval of surface reflectance from hyperspectral data using a look-up table approach, Canadian Journal of Remote Sensing, 23 (4): 354-368.

Vincent, B., Vidal, A., Tabbet, D., Baqri, A., Kuper, M., 1996. Use of satellite remote sensing for the assessment of waterlogging and salinization as an indication of the performance of drained systems, 16th Congress ICID, Egypt, 15-22 September 1996, New Delhi, India.

Zhan, X., Sohlberg, R.A., Townshend, J.R.G., DiMiceli, C., Carroll, M.L., Eastman, J.C., Hansen, M.C., DeFries, R.S., 2002. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. Remote Sensing of Environment: 83: 336 – 350.

Часть 3

ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОЕ ОРОШЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ВОДОЙ

Глава 6.

СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ГРАФИКА ПОЛИВОВ: WINISAREG И GISAREG

П.С. Фортес[10], П.Р. Теодоро[10], А.А. Кампос[10], П.М. Матеус[10], Л.С. Перейра[10]

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 тестированную 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 Doorenbos & 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.

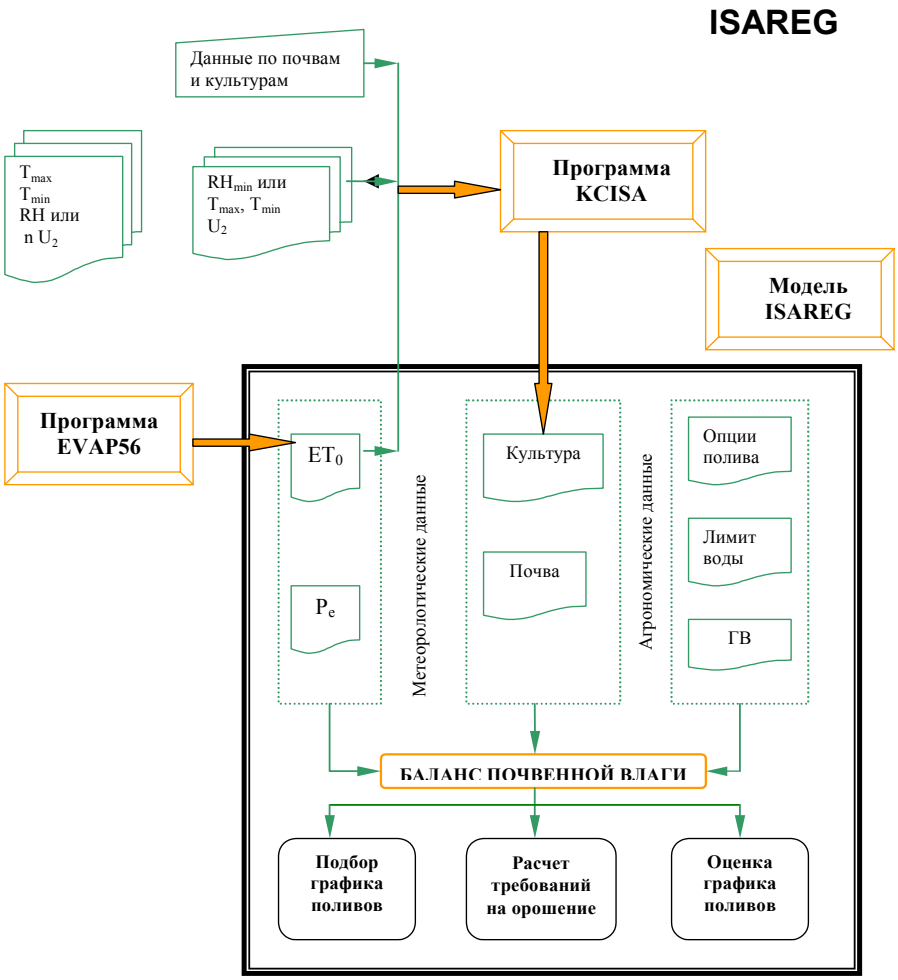


Рис. 1. Схема модели ISAREG и ее связь с программами KCISA и EVAP56

WINISAREG

WINISAREG – последняя версия модели для Windows (Pereira *et al.*, 2003). Модель имеет две дополнительных 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 (Kc_{ini}, Kc_{mid} и Kc_{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).

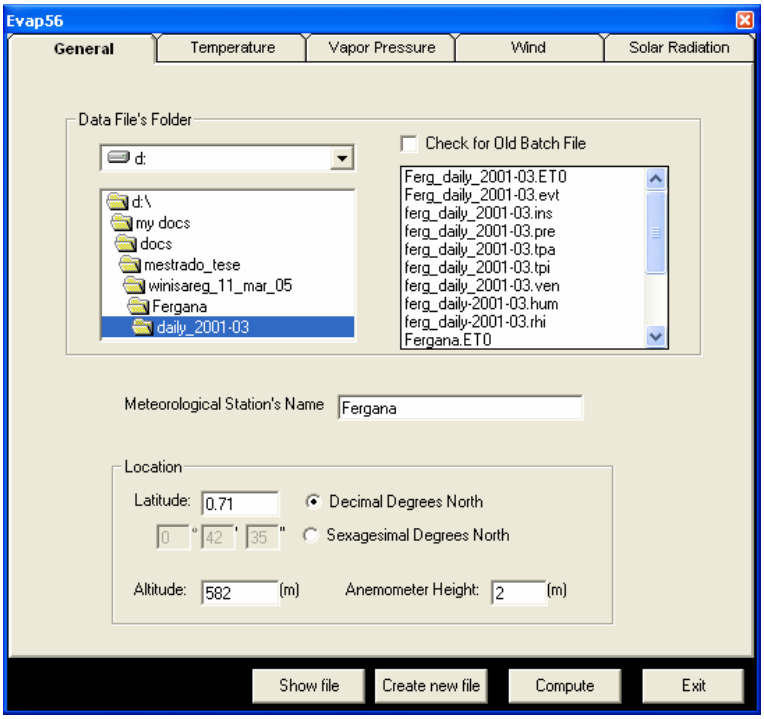


Рис. 2. Главное меню расчета ET_0

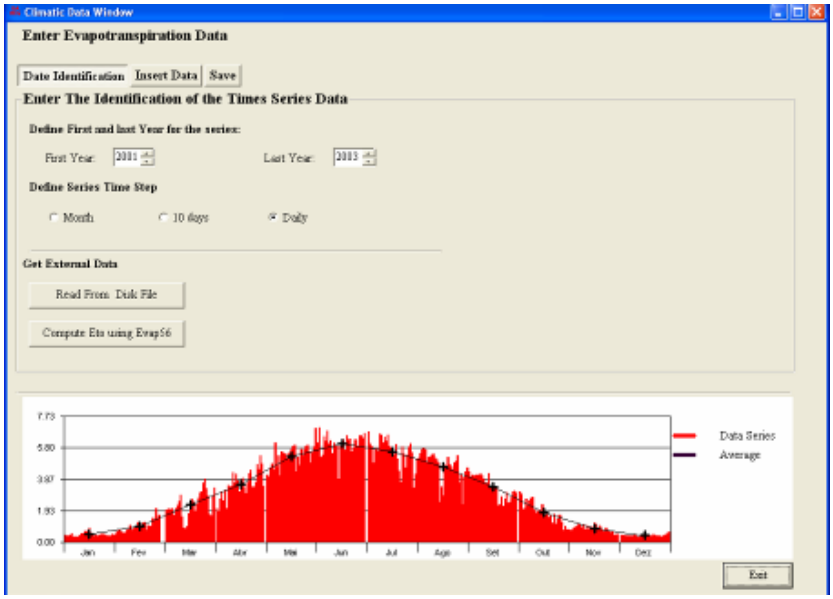


Рис. 3. Окно для ввода исходных данных и ознакомления с вычисленными ET_0

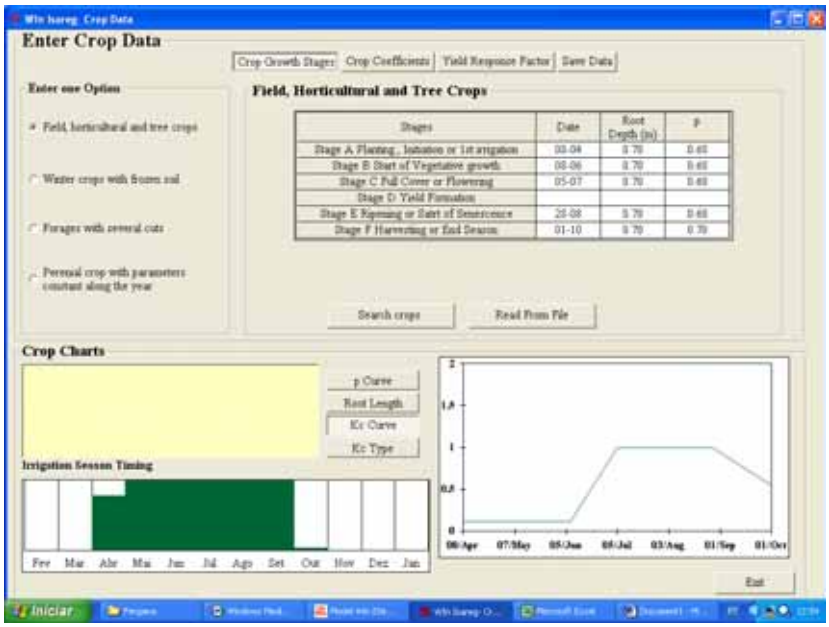
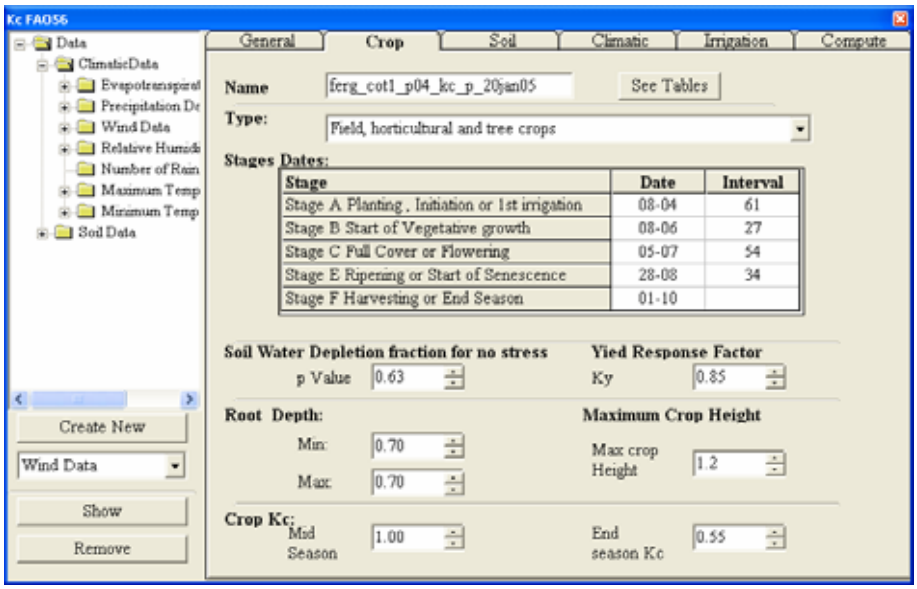


Рис. 4. Интерфейс WINISAREG для данных по сельхозкультуре

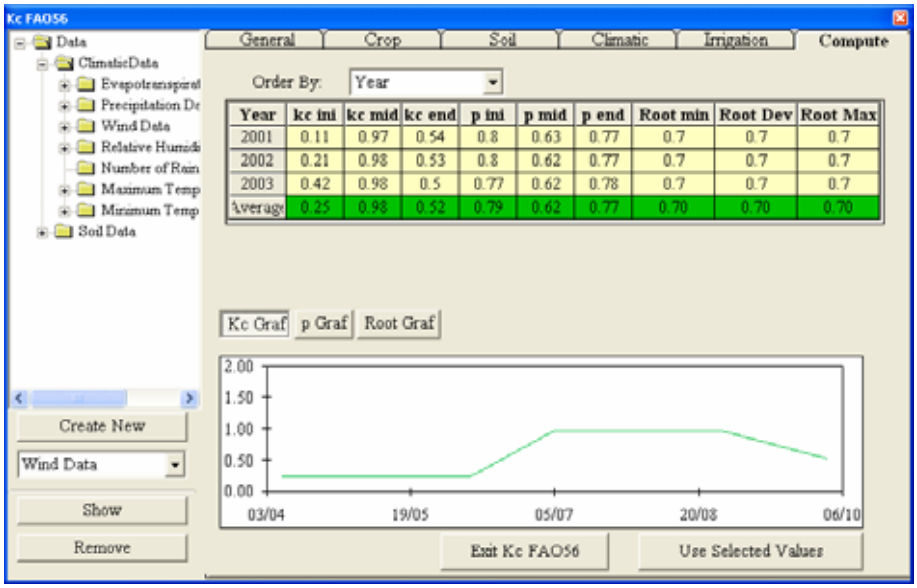
В WINISAREG содержится алгоритм для учета воздействия засоления на ET_c и урожайность (Campos *et al*., 2003). Модель начинает расчеты почвенной влаги с исходной влажности почвы, задаваемой пользователем, или рассчитывает из предшествующего периода нахождения почвы под паром в конце лета, когда большая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



a)



b)

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

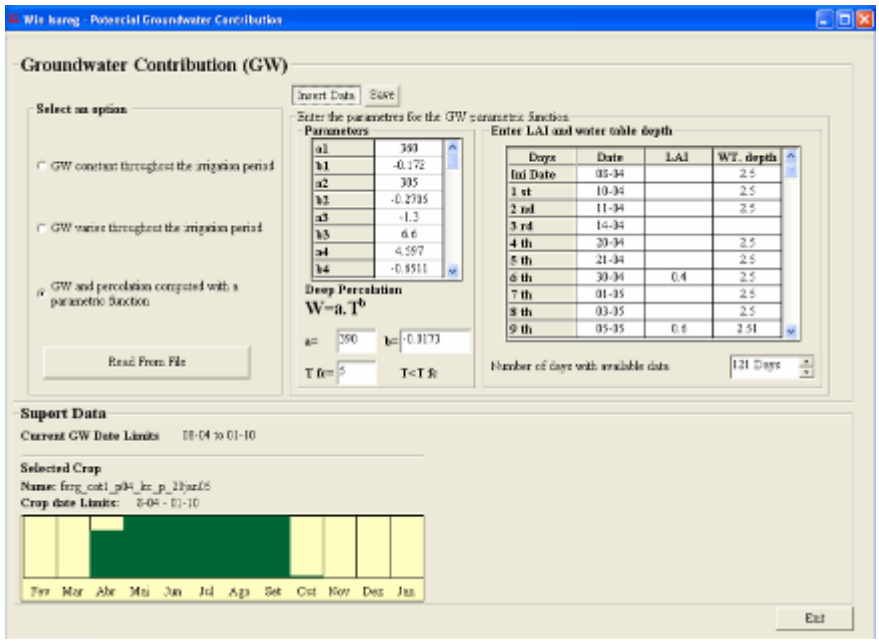


Рис. 6. Интерфейс WINISAREG для расчета подпитки из грунтовых вод, используя параметрическое уравнение

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 уровнях орошения и ограничениях водоподачи; 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 (ºC) 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, метеоданные для каждого поля. В этом исследовании рассматривались три метеорологические станции. Кроме того, также осуществлялся выбор полей для расчетов по модели. Невозделываемые 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).

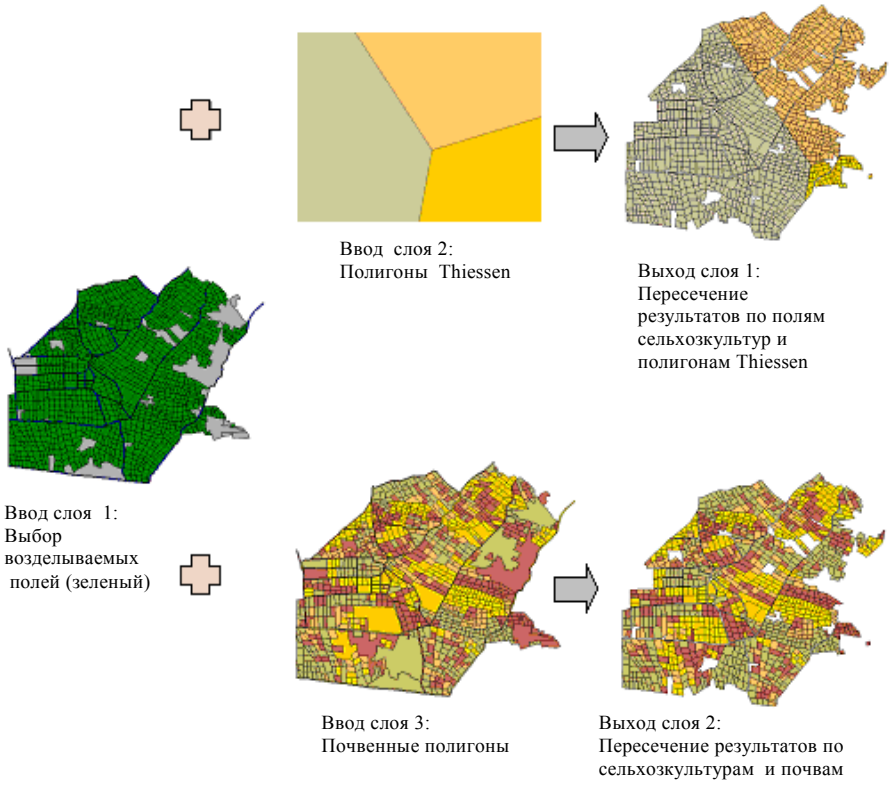


Рис. 7. Вверху: выбранные возделываемые поля, пересекающиеся с полигоном Thiessen, связанным с метеоданными; внизу: почвы, пересекающиеся с возделываемыми полями. Для обеих операций также включена идентификация полей для расчетов

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.

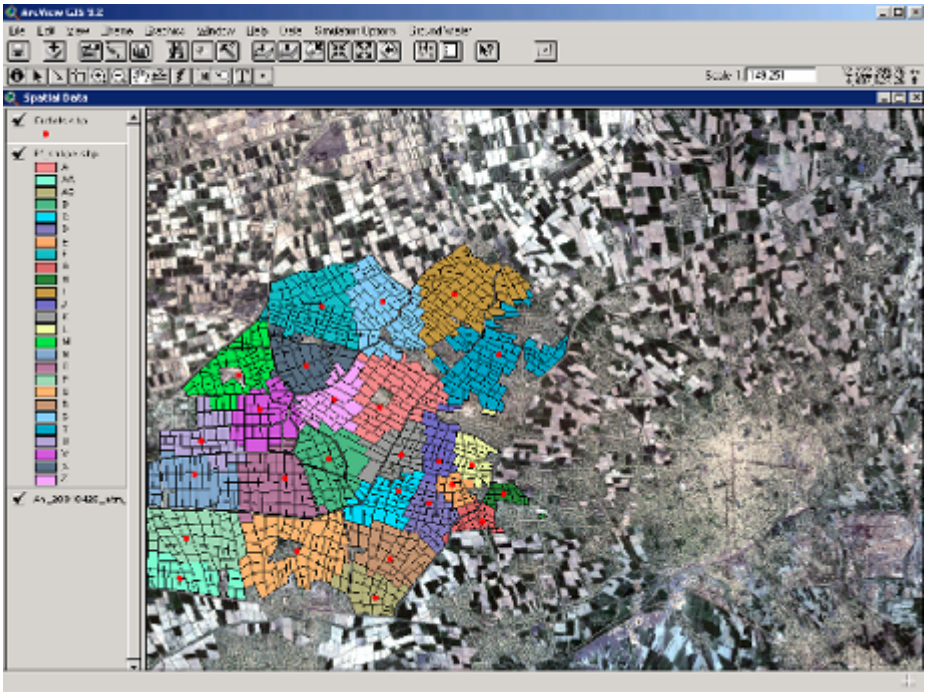


Рис. 8. Результаты применения средств Assign Proximity
для идентификации ближайшего водовыпуска

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.

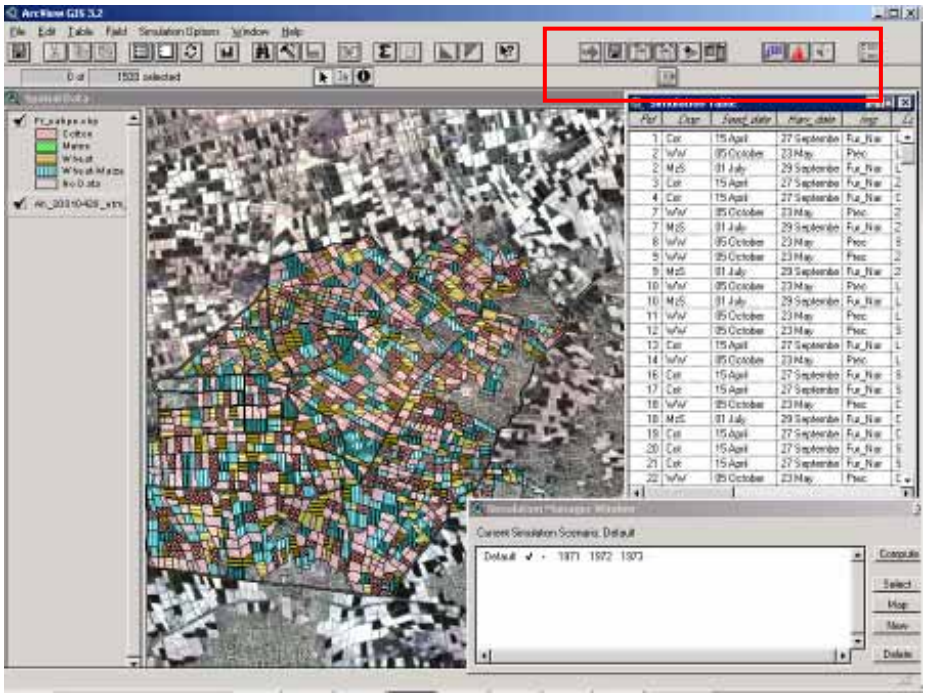
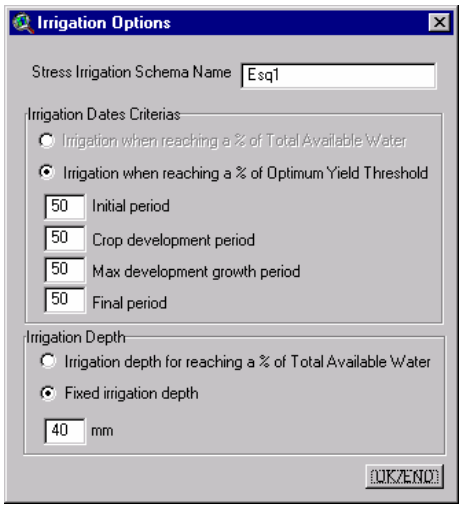
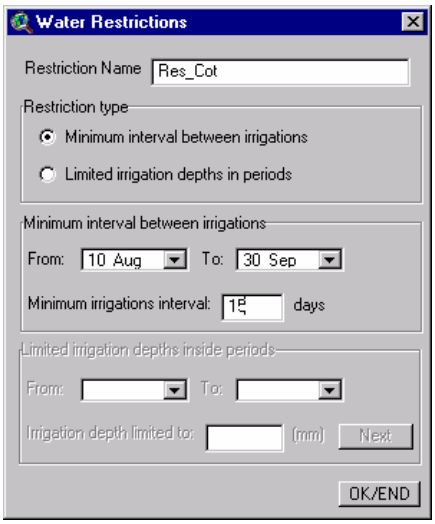


Рис. 9. Основной вид применения GISAREG, включая карту сельхозкультур и соответствующую легенду, расчетную таблицу (ST) и окно управления сценариями (внизу справа). Вверху слева меню опций моделирования и вверху справа – кнопки и инструментарии для редактирования сценариев вывода карт



a)

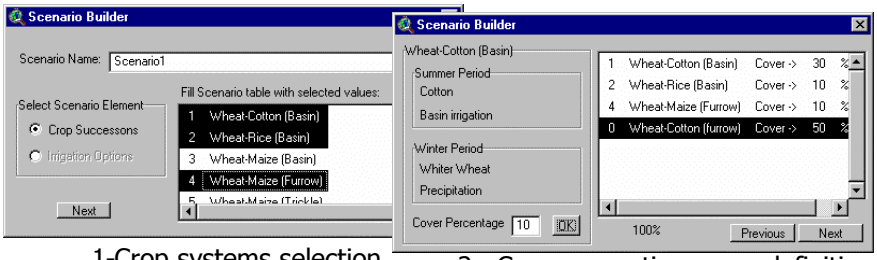


b)

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

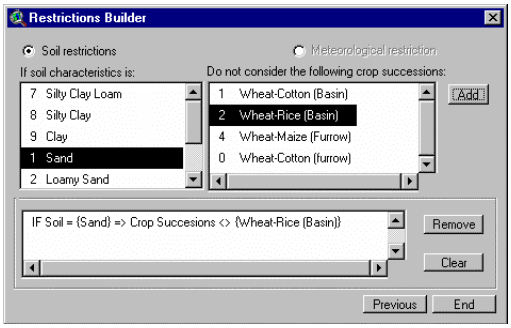
Ограничения водоподачи применяют к выбранным периодам времени и адресованы минимальному интервалу между двумя последовательными поливами или сумме поливных норм, которые могут быть использованы на поливе в течение данного временного промежутка. В примере на рис. 10b ограничение водоподачи под кодом “Res_Cot” 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 «crop» 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.



1-Crop systems selection

2 - Crop occupation areas definition



3-Crop soil restrictions

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.

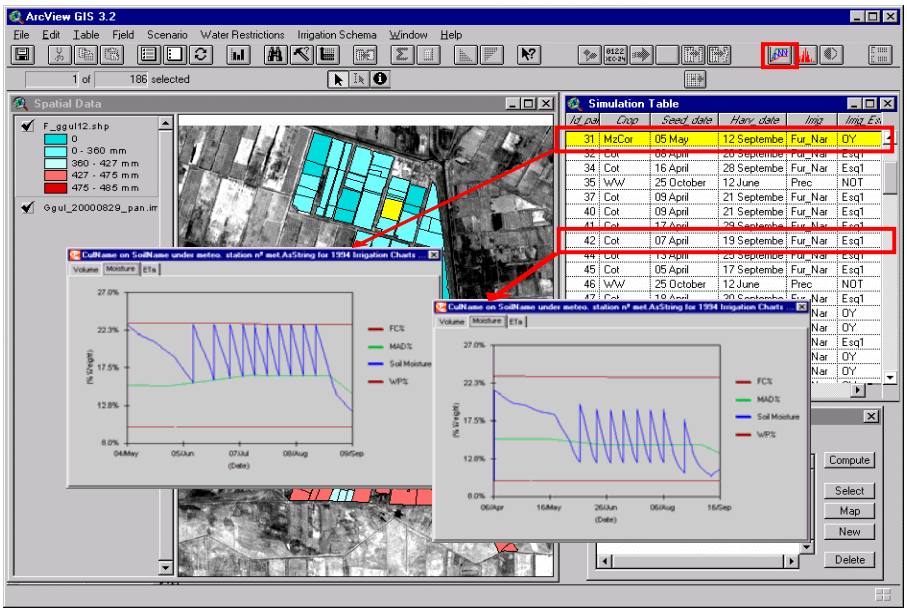


Рис. 12. Результаты расчетов, представленные в виде карты требований на орошение и водно-балансовых диаграмм для двух полей с различными вариантами графика поливов, одним без стресса, другим с водосбережением при контролируемом водном стрессе

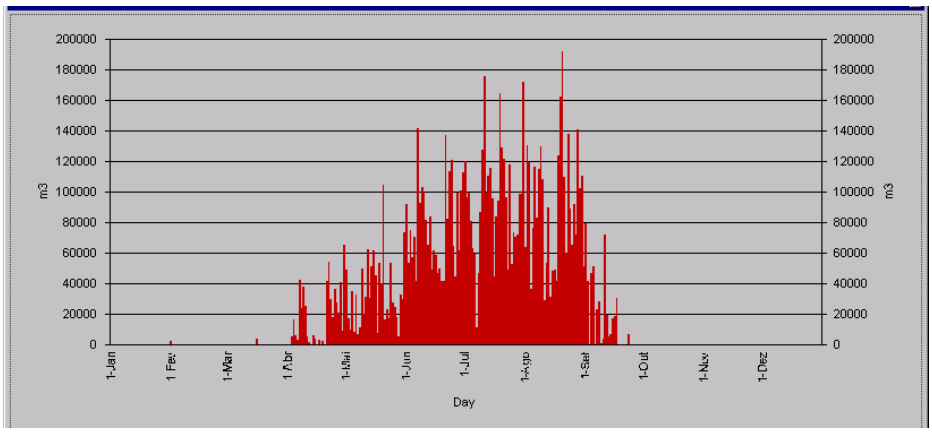


Рис. 13. Гидрограф требований на орошение в течение вегетационного периода для выбранного узла распределительной системы

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 Nº 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. Чолпанкулов[11], О.П. Инченкова[11], Л.С. Перейра[12], П. Парадес[12]

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 наблюденных 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 сходимость 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

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

соответственно из эталонной эвапотранспирации (ET_o, 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_o 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 (Gc) и фильтрации (Liu *et al*., 2001), где Gc 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_o 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:

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

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

$$Gmax = k \cdot ETm \qquad при\ Dw \le Dwc \qquad [3a]$$

$$Gmax = a_4 \cdot Dw - b_4 \qquad при\ Dw > Dwc \qquad [3b]$$

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

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

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

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

Уравнение	Условия	Параметры
$W_c = a_1 \cdot D_w^{b_1}$		a1 = W_{Fc}, влагоемкость почвы до глубины 1.0 м при полевой влагоемкости b1 = -0,17
$W_s = a_2 \cdot D_w^{b_2}$		a2 = 1,1 (W_{Fc} + W_{Wp})/2, влагоемкость выше среднего между значениями полевой влагоемкости и точкой завядания b2 = -0,27
$D_{wc} = a_3 \cdot ET_m + b_3$ $D_{wc} = 1.4$	при $ET_m \le 4$ мм/сут при $ET_m > 4$ мм/сут	a3 = -1,3 b3 = 6,7 для глинистых почв и пылевато-иловатых суглинков, и снижается до 6,2 для глинистых песков
$G_{max} = k \cdot ET_m$ $G_{max} = a_4 \cdot D_w^{b_4}$	при $D_w \le D_{wc}$ при $D_w > D_{wc}$	a4 = 4,6 для иловатых и пылевато-иловатых суглинков, снижается до 3 для глинистых песков b4 = -0,65 для иловатых суглинков и снижается до –2,5 для глинистого песка
$k = 1 - e^{-0.6 \cdot LAI}$	при $ET_m \le 4$ мм/сут	
$k = 38/ETm$	при $ET_m > 4$ мм/сут	

Функция W_c (D_w) задается как

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

а W_s(D_w) определяется как

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

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

Фильтрационные потоки рассчитываются с помощью уравнения спада

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

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 Арнасая, 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 (40,2º северной широты, 68,6º 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°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.

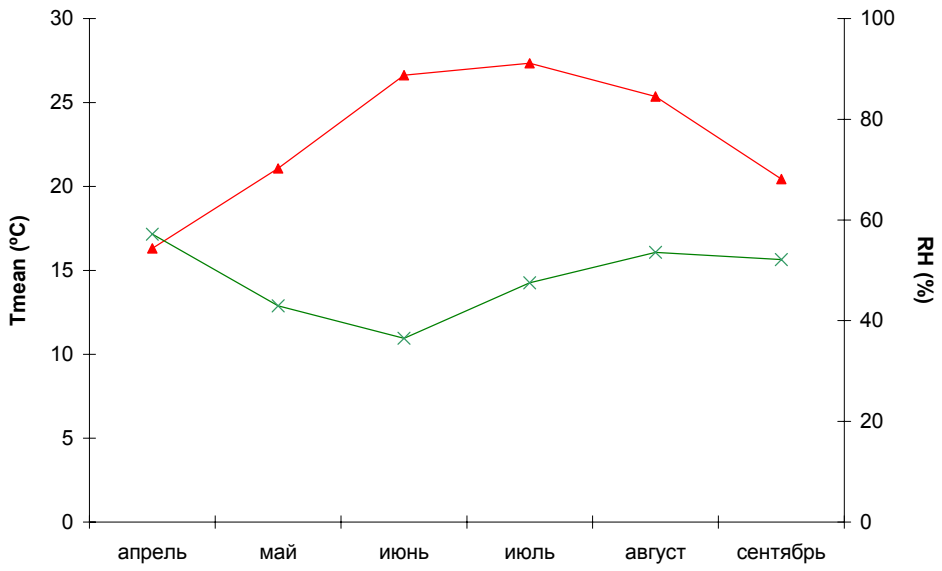


Рис. 1. Голодная степь, 1982-1988 гг.:
среднемесячная температура и относительная влажность

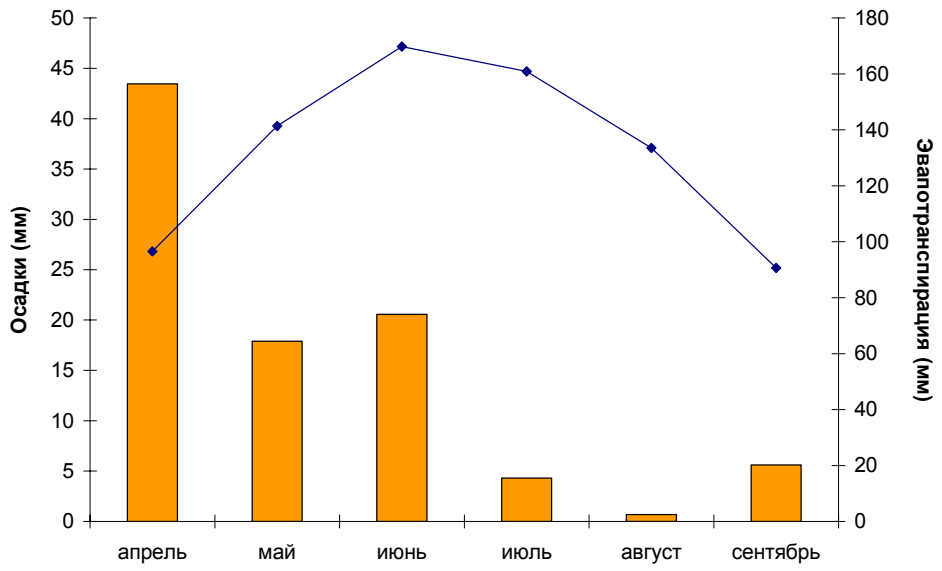


Рис. 2. Голодная степь, 1982-1988 гг.:
Среднемесячное количество осадков ( ) и среднемесячная эталонная эвапотранспирация (ETo) ( )

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:

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

где E – суммарное испарение (мм) или рассчитанный тепловой поток, R – радиационный баланс (кал/см^2) или чистая радиация, B – тепловой поток в почву (кал/см^2), Q – турбулентный теплообмен (кал/см^2) или поток физического тепла, CF – коэффициент пересчета единиц и временного масштаба наблюдений.

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

		апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
$T_{сред}$	$\overline{X}$	16,3	21,1	26,6	27,3	25,4	20,4
[ºC]	s	*1,5*	*2,4*	*0,9*	*1,7*	*1,4*	*1,2*
RH	$\overline{X}$	58	43	37	48	54	52
[%]	s	*8,8*	*6,9*	*5,4*	*10,2*	*9,3*	*10,6*
u_z	$\overline{X}$	2	2	1,5	1	1	1
[м с$^{-1}$]	s	*0,6*	*0,5*	*0,4*	*0,4*	*0,4*	*0,5*
n	$\overline{X}$	7,3	9,4	10,5	10,7	9,8	8,2
[h]	s	*1,2*	*1,9*	*3,3*	*4,4*	*4,2*	*3,1*
ET_O	$\overline{X}$	3	5	6	5	5	3
[мм сут$^{-1}$]	s	*0,4*	*0,5*	*0,7*	*1,0*	*1,0*	*0,5*
P	$\overline{X}$	44	18	21	4	1	6
[мм]	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/см^2 мин, $\Delta T \geq 0{,}3$ ºC ($\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$) и $\Delta e \geq 0{,}3$ мбар ($\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$), турбулентный теплообмен определяется как:

$$Q = (R\text{-}B)\,\Delta T/\,(\Delta T + 1.56\,\Delta e) \qquad [9]$$

или когда вышеуказанное условие не выполняется

$$Q = 1{,}35 * K * \Delta T \qquad [10]$$

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

$$K = 0{,}104 * m * \Delta u \qquad [11a]$$

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

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

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

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

с

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

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):

$$ETp = 0{,}0018\, (T+25)^2\, (100 - RH) \qquad [14]$$

где ETp (мм) – потенциальная эвапотранспирация, T (ºC) – 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} ($м^3/м^3$)	θ_{WP} ($м^3/м^3$)	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).

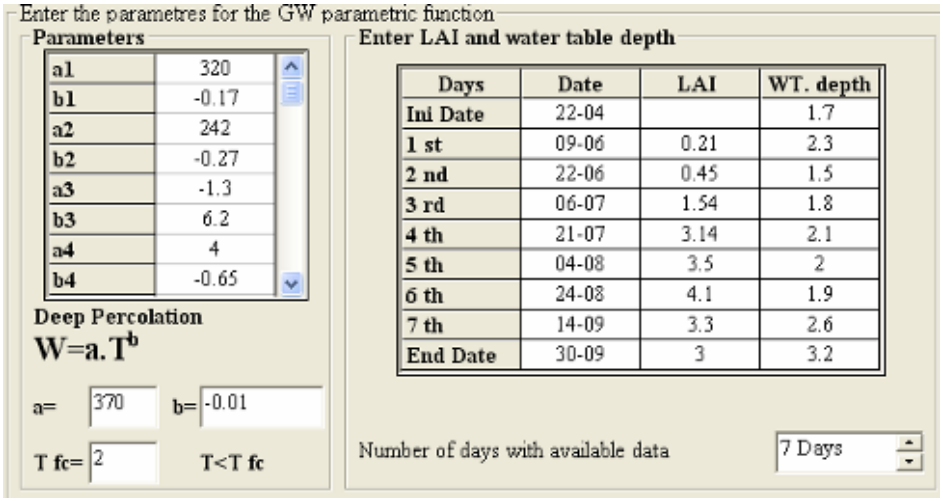
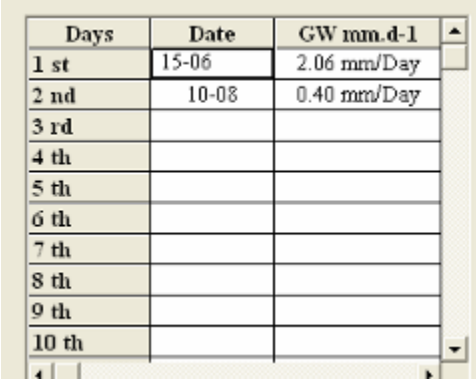


Рис. 3. Окно WINISAREG, показывающее параметры, используемые для расчета подпитки и уровней грунтовых вод за 1983 год в Голодной степи



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 «Толойкон»). 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 «Толойкон») 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)	40.77º N	71.09º E	439	2
«Карасу» (Кыргызстан)	40.3º N	72.48º E	888	10

Абсолютный максимум температуры приходится на июль (до +35ºС), абсолютный минимум наблюдается в январе (-14^{0}С). Количество осадков изменяется в пределах 90-387 мм. Данные за период 1970-2003 гг. по среднемесячным максимальным и минимальным температурам и относительной влажности, среднемесячным количествам 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).

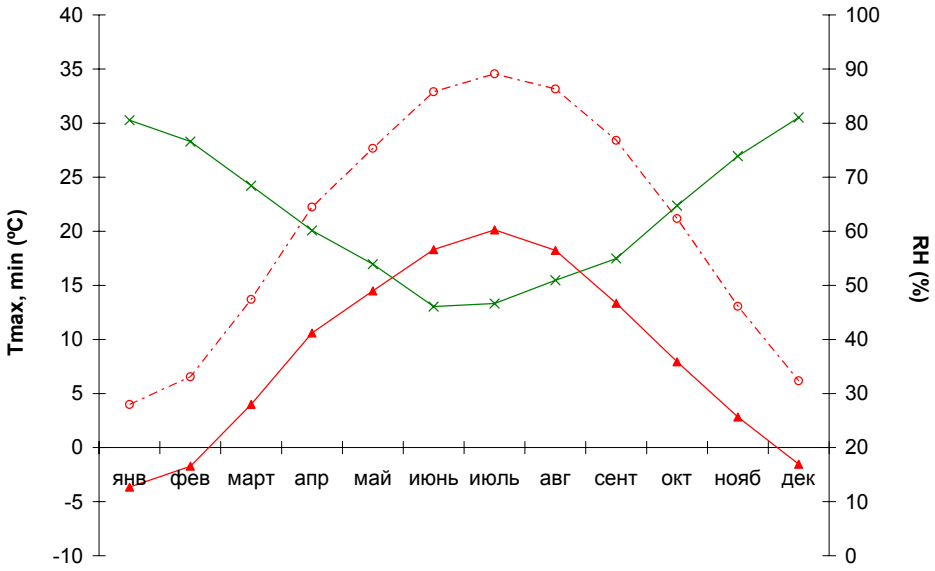


Рис. 5. Среднемесячные минимальные и максимальные температуры и относительная влажность, полученные с метеостанции «Фергана» (1970-2003)

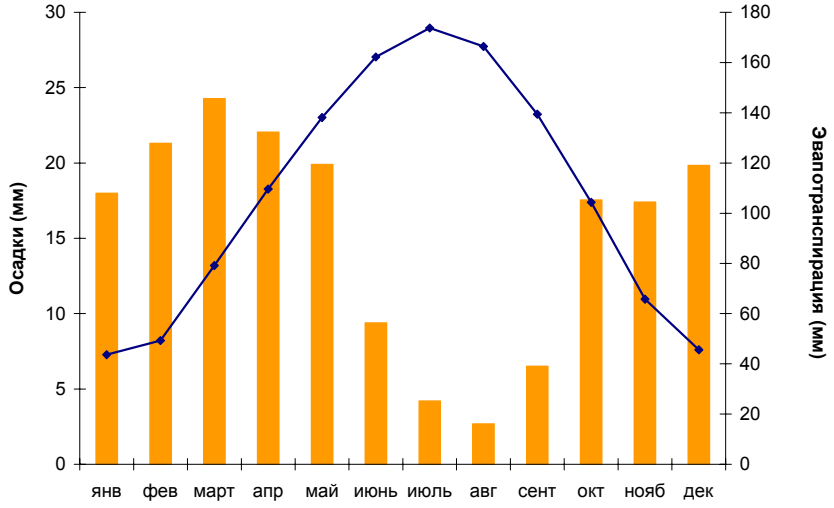


Рис. 6. Среднемесячные осадки (▬) и среднемесячная эталонная эвапотранспирация (ET_o) (▬◆▬), полученные с метеостанции «Фергана» (1970-2003)

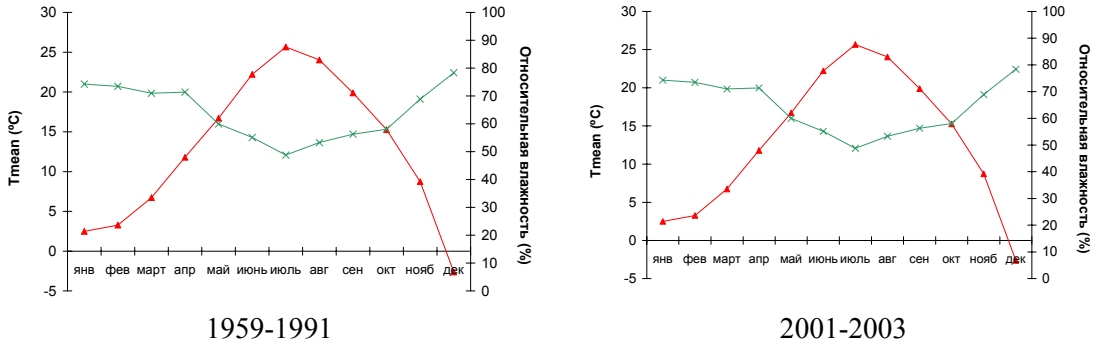


Рис. 7. Среднемесячная температура ▲ и относительная влажность ✕ по метеостанции «Карасу»

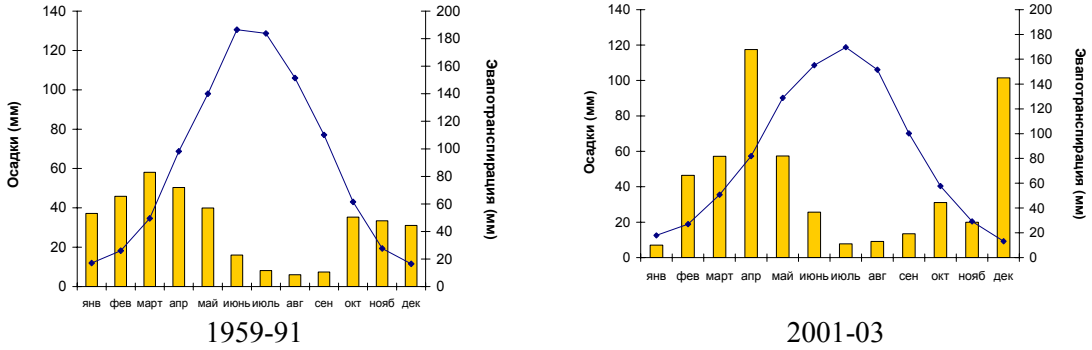


Рис. 8. Среднемесячные осадки (▬) и среднемесячная эталонная эвапотранспирация (ET_o) (▬◆▬) по метеостанции «Карасу»

Таблица 5. Среднее ($\overline{X}$) 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}	$\overline{X}$	-3,7	-1,7	4,0	10,6	14,5	18,3	20,1	18,2	13,3	7,9	2,8	-1,5
[ºC]	*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}	$\overline{X}$	4,0	6,6	13,7	22,3	27,7	32,9	34,6	33,1	28,4	21,2	13,1	6,2
[ºC]	*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	$\overline{X}$	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	$\overline{X}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0
[м c^{-1}]	*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	$\overline{X}$	3	4	5	7	9	11	11	11	9	7	5	3
[h]	*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	$\overline{X}$	1,4	1,7	2,5	3,7	4,5	5,5	5,7	5,4	4,7	3,4	2,2	1,5
[мм сут.$^{-1}$]	*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	$\overline{X}$	18	21	24	22	20	9	4	3	6	18	17	20
[мм]	*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 ($\overline{X}$)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}	59-91	$\overline{X}$	-2,6	-0,4	6,3	14,2	18,9	23,8	25,3	23,1	18,6	12,3	5,5	0,2
[ºC]		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	$\overline{X}$	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	$\overline{X}$	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	$\overline{X}$	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	59-91	$\overline{X}$	1	1	2	3	5	6	6	5	4	2	1	1
[мм сут$^{-1}$]		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	$\overline{X}$	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	59-91	$\overline{X}$	37	46	58	50	40	16	8	6	7	35	33	31
[мм]		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	$\overline{X}$	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} ($м^3$ $м^{-3}$)	θ_{WP} ($м^3$ $м^{-3}$)	TAW (мм/м)
Хоз-во «Азизбек-1»	Хлопчатник (поле #13)	0-0,35	0,37	0.2	155
		0,35-0,50	0,32	0.19	
		0,50-0,76	0,35	0.19	
		0,76-1,30	0,35	0.2	
	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	$ET_m \leq 4$ *мм/сут*
$D_{wc} = 1.4$	при	$ET_m > 4$ *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	$ET_m \leq 4$ *мм/сут*
$k = 38/ETm$	при	$ET_m > 4$ *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.

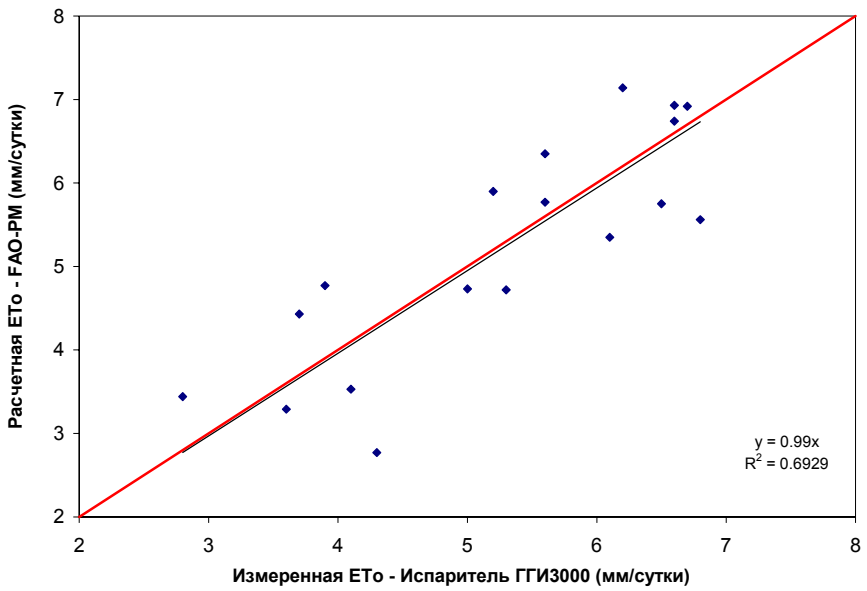


Рис. 9. Сопоставление наблюденных (испаритель ГГИ-3000) и расчетных (ФАО-ПМ) значений месячной эталонной эвапотранспирации для Голодной степи, 1984-1986)

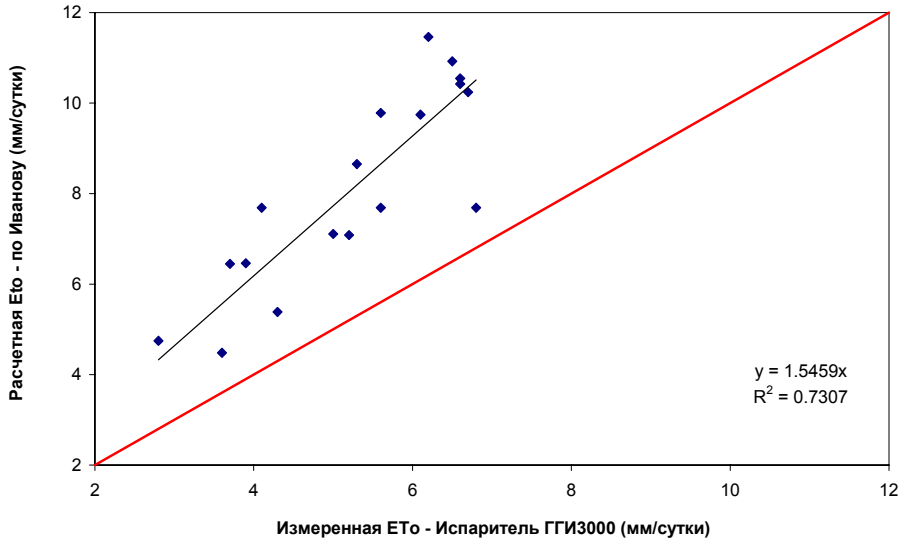


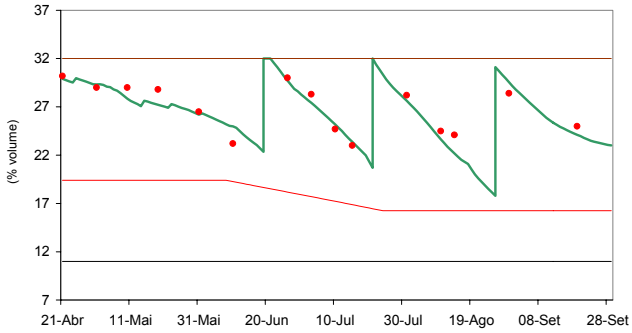
Рис. 10. Сопоставление наблюденной (испаритель ГГИ-3000) и вычисленной по методу Иванова потенциальной эвапотранспирации (месячные значения, Голодная степь, 1984-1986)

Содержание почвенной влаги

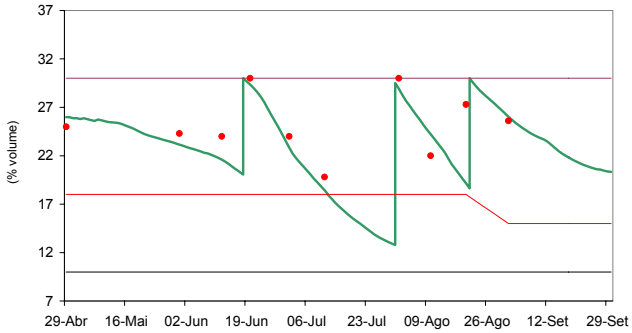
При калибровке/проверке модели ISAREG для условий центральноазиатского региона были использованы данные полевых наблюдений по совхозу «Фергана» Сырдарьинской области за 1983-1988 гг. Использованные для калибровки данные включали метеоданные для расчета ET_o, как указывалось выше, уровни грунтовых вод 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 наблюденными значениями почвенной влажности. Поливные нормы, соответствующие смоделированным экспериментам, приведены в таблице 9. Результаты сравнения расчетной и наблюденной 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)

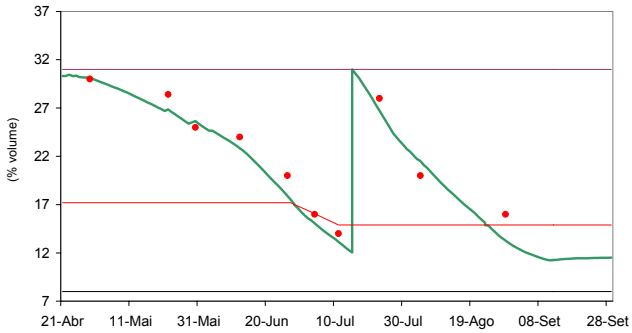
Год	Сроки	Поливы после сева (мм)	Оросительная норма (мм)
1982	1 июль 6 август	260 260	520
1983	20 июнь 22 июль 27 август	230 200 200	630
1984	18 июнь 31 июль 21 август	161 250 219	630
1985	16 июль	310	310
1986	3 июнь 3 июль 11 август	62 200 170	432
1987	14 июль 30 август	220 180	400



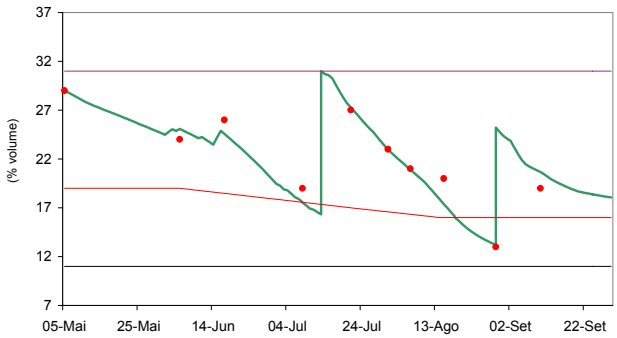
а)



б)



в)



г)

Рис. 11. Расчетные (——) и наблюденные (•) 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 наблюденных и расчетных величин почвенной влажности приводится на рис. 12, который показывает коэффициент регрессии, близкий к 1,0 и высокий коэффициент смешанной корреляции.

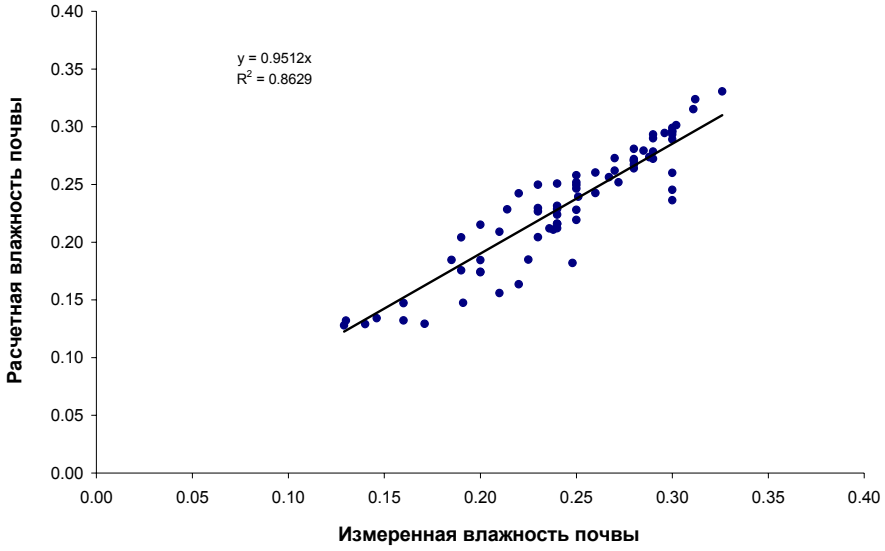


Рис. 12. Сопоставление наблюденной и расчетной почвенной влажности (Голодная степь, 1982-1987).

Эвапотранспирация сельхозкультур

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

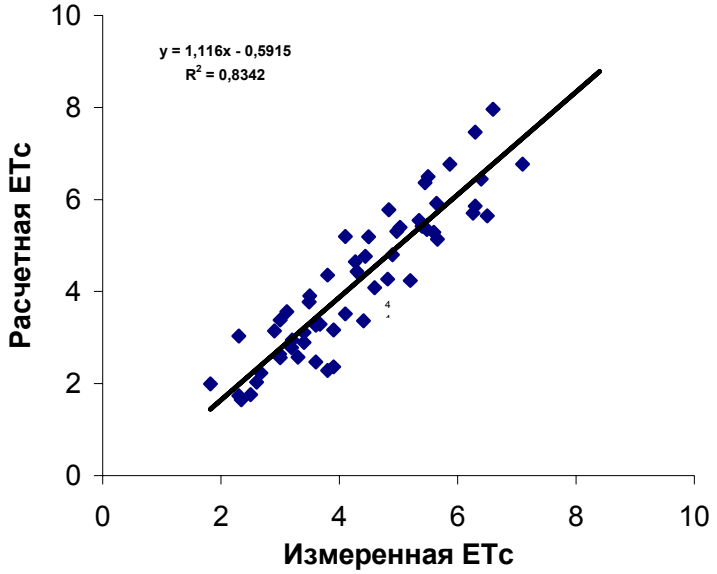


Рис. 13. Наблюденные и рассчитанные значения эвапотранспирации (мм/сутки) сельхозкультуры (Голодная степь, 1982-1988).

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

Наблюденные 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
Наблюденные	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 хлопкчатника, коэффициенты сельхозкультуры (Kc) 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_o 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 (ºC), 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 наблюденными значениями по испарителю ГГИ-3000 показаны на рис. 14 и 15.

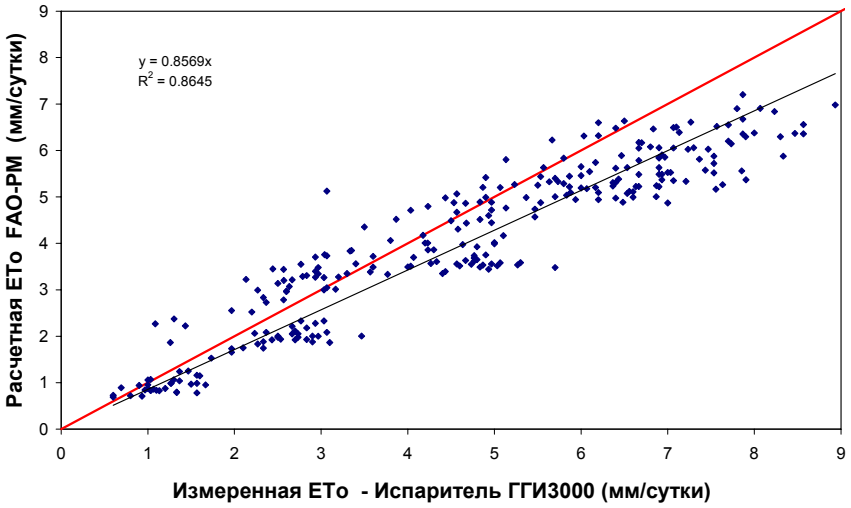


Рис. 14. Сравнение наблюденных средних декадных значений (испаритель ГГИ-3000) и расчетных значений (ФАО-ПМ) эталонной эвапотранспирации (мм $сут^{-1}$) по м/с «Фергана», 1970-2003

Из рис. 14 и 15 можно сделать вывод, что наблюденные 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 ЕТ, определенной по уравнению Иванова (рис. 16). Для преобразования последней величины в ЕТ ФАО-ПМ требуется коэффициент преобразования равный 0,70.

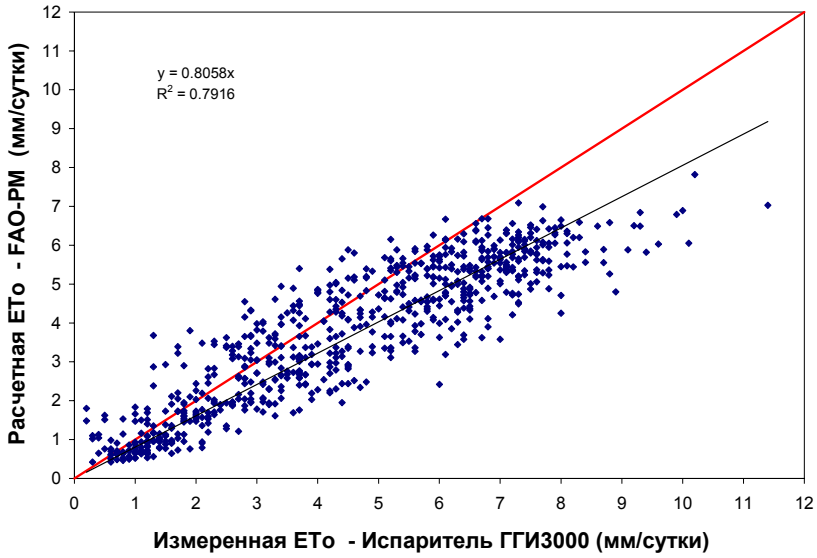


Рис. 15. Сравнение замеренных по испарителю ГГИ-3000 и рассчитаных по ФАО-ПМ суточных значений эталонной эвапотранспирации (мм/сутки) в Ферганской области (2001-2003)

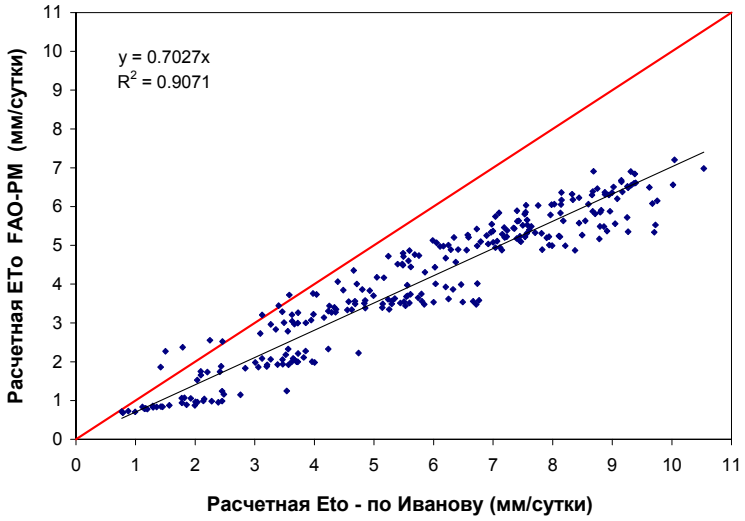


Рис. 16. Сравнение значений эталонной эвапотранспирации (мм/сутки), полученных по методу ФАО-ПМ, и ET, рассчитанных по формуле Иванова, для Ферганской области за период 1970-2003 (апрель-ноябрь)

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 наблюденных по испарителю ГГИ-3000 и рассчитанных (ФАО-ПМ) 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 ETp по формуле Иванова (рис. 18). Для преобразования последних значений в ET ФАО-ПМ требуется коэффициент пересчета 0,76, который равен коэффициенту для Ферганы.

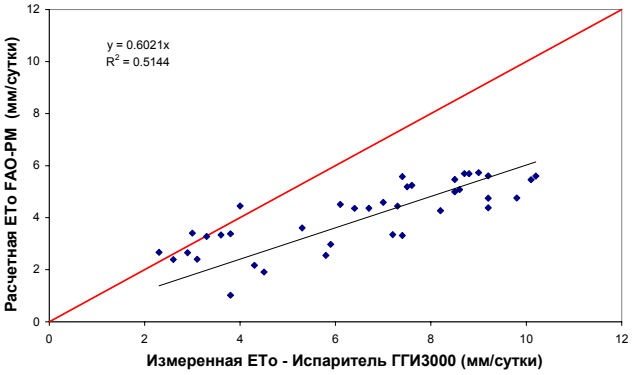


Рис. 17. Сравнение наблюденных (испаритель ГГИ-3000) и расчетных значений (ФАО-ПМ) эталонной эвапотранспирации (мм/сутки) для Ошской области, 2001-2003

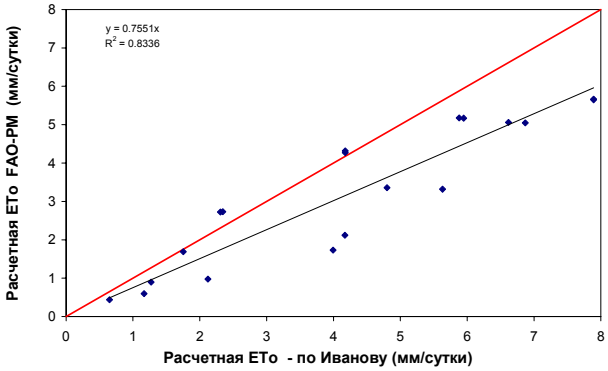


Рис. 18. Сравнение значений эталонной эвапотранспирации (мм/сутки), полученных по методу ФАО-ПМ, и ET, рассчитанных по формуле Иванова для Ошской области за период 2001-2003

Хлопчатник

Обоснование модели ISAREG для хлопчатника было выполнено путем сравнения расчетных и наблюденных 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 4 июль 17 июль 30 июль 14 август 16 сен-тябрь	119 202 113 155 183 93	865
«Азизбек-1» (поле #5)	2 июнь 25 июнь 11 июль 25 июль 7 август	127 174 123 111 86	621
«Сандык»	24 июнь 13 июль 27 июль 9 август 12 август	177 78 58 14 100	427

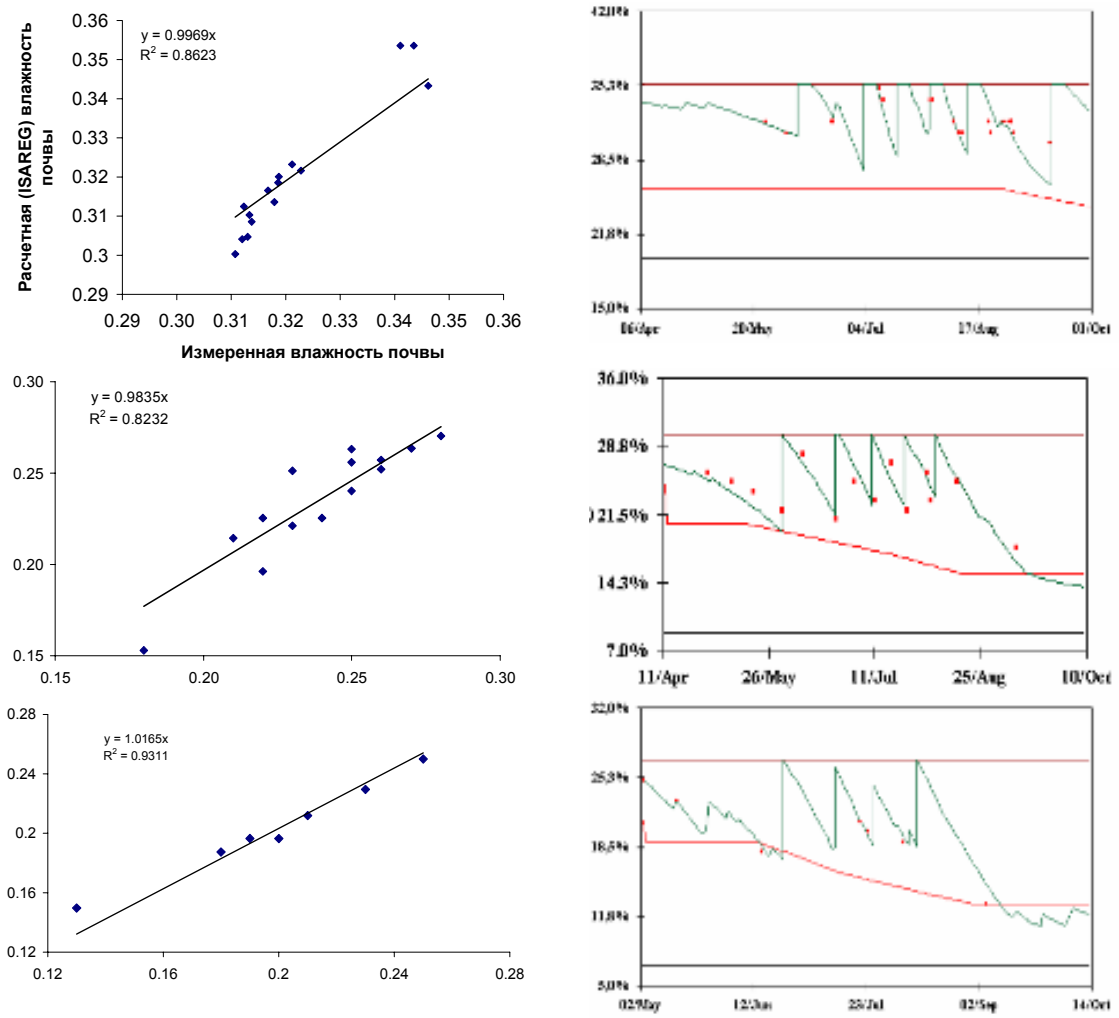


Рис. 19. Сравнение наблюденных и рассчитанных значений почвенной влажности для хлопчатника: a) и b) в хоз-ве «Азизбек-1», 2001 (поля #13 и 5); c) в хоз-ве «Сандык», 2003

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				
	Начальная	*Развитие*	*Сер. сезона*	*Конец сезона*
Период (сроки)	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 наблюденные 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 наблюденные 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.

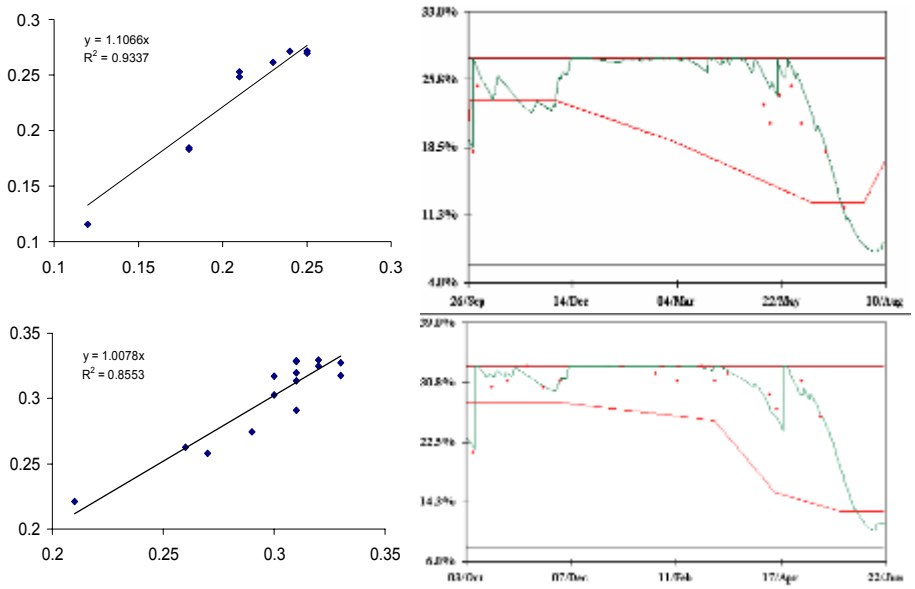


Рис. 20. Сравнение наблюденных и рассчитанных значений почвенной влажности для озимой пшеницы, хозяйство «Толойкон», 2001-2002 (вверху) и хозяйство «Азизбек-1», 2001-2002 (внизу)

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
Хозяйство «Азизбек-1»(Ферганская область)					
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		
Хозяйство «Толойкон» (Ошская область)					
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 ET высокая, а глубина залегания грунтовых вод небольшая вследствие поливов на соседних полях. Это относится как к хлопчатнику, так и к озимой пшенице.

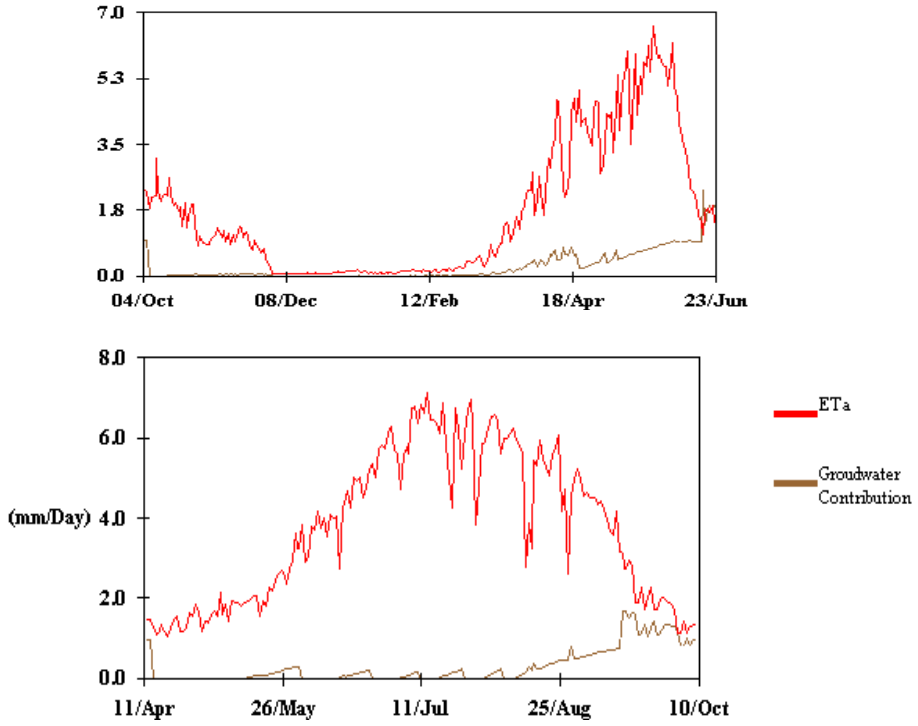


Рис. 21. Фактическая эвапотранспирация и подпитка с грунтовых вод (мм/сут) в вегетационный период: a) озимой пшеницы (2001-2002), b) хлопчатника (2001), хозяйство «Азизбек-1»

Выводы

Исследование показывает, что применение старых методов к оценке эталонной эвапотранспирации ET – испаритель ГГИ-3000 и формула Иванова ETp – дает относительно высокие колебания по участкам. Коэффициенты, увязывающие эти два оценочных метода, а также эти же методы с вычисленной по методу ФАО-ПМ ETo, имеют разные значение по Фергане и Голодной степи. Для принятия общих коэффициентов сельхозкультур требуется, чтобы колебания ETo 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 ET хлопчатника в Сырдарьинской области Голодной степи. Как для почвенной влажности, так и ET сельхозкультуры, коэффициенты регрессии, связывающие расчетные и наблюденные 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 наблюденных 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: Гидрометеоиздат (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, Гидрометеоиздат.

Средазгипроводхлопок, 1970. Расчетные средние значения оросительных норм сельскохозяйственных культур в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи. 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. Технических 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 Аии. 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 Nº 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. Чолпанкулов[13], О.П. Инченкова[13], П. Парадес[14], Л.С. Перейра[14]

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 переполивами (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 Zr 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:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - RO_i) + I_{w\,i} - ET_{c\,i} - DP_i + GW_i}{1000 z_{r\,i}} \qquad [1]$$

где θ_i и θ_{i-1} – содержание почвенной влаги в корневой зоне (м^3 м$^{-3}$ или мм мм$^{-1}$), в дни i и i-1, P_i – атмосферные осадки (мм), RO_i – поверхностный сток (мм), I_{ri} - 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 грунтовый 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

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

тогда соответствующая поливная норма нетто будет равна

$$I_{ni} = 1000 z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_p) \qquad [3]$$

Полив назначается, когда достигается допустимое управлением 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

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

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

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

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

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

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 ($RYL = 1 - Y_d / Y_c$):

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

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 «Толойкон» 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:

(a) *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, Кс	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, Кс	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, Кс	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, Кс	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, Кс	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, Кс	0,45	0,45-1,1	1,1	1,1-0,4

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

	Поливы					
	1982		***1983***		***1984***	
	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	
	1985		***1986***		***1987***	
	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

	Поливы					
	1982		***1983***		***1984***	
	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	
	1985		***1986***		***1987***	
	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).

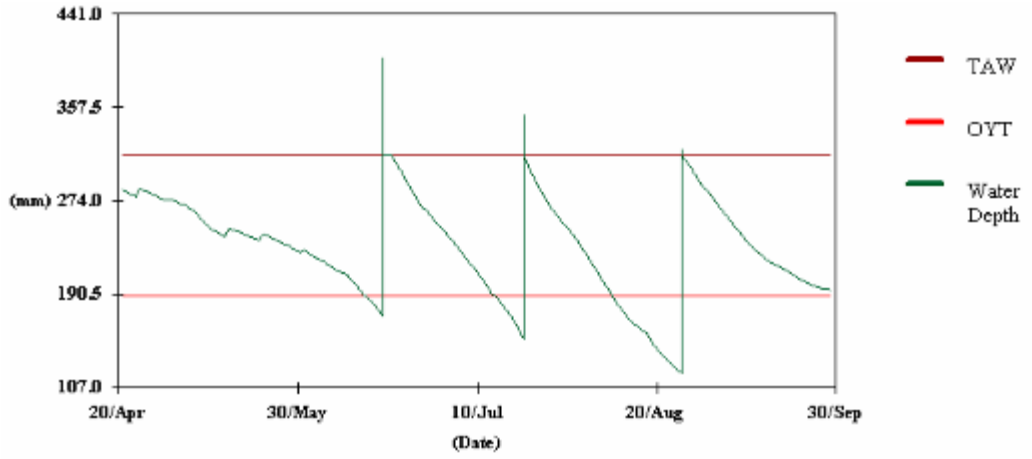


Рис. 1. Колебания влажности почвы за сезон при типичном фактическом графике орошения, указывающие на возникновение как глубинной фильтрации, так и водного стресса, Голодная степь, 1983

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

	Поливы					
	1982		***1983***		***1984***	
	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	
	1985		***1986***		***1987***	
	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.

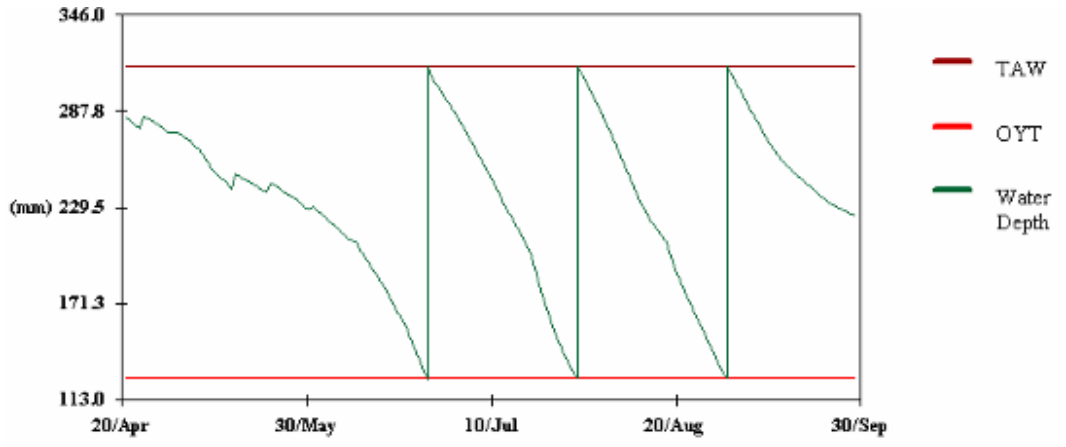


Рис. 2. Динамика влажности почвы при применении усовершенствованного графика поливов во избежание фильтрации и водного стресса, p=0,6 Голодная степь, 1983

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

	Поливы					
	1982		***1983***		***1984***	
	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	
	1985		***1986***		***1987***	
	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

	Поливы					
	1982		***1983***		***1984***	
	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	
	1985		***1986***		***1987***	
	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	

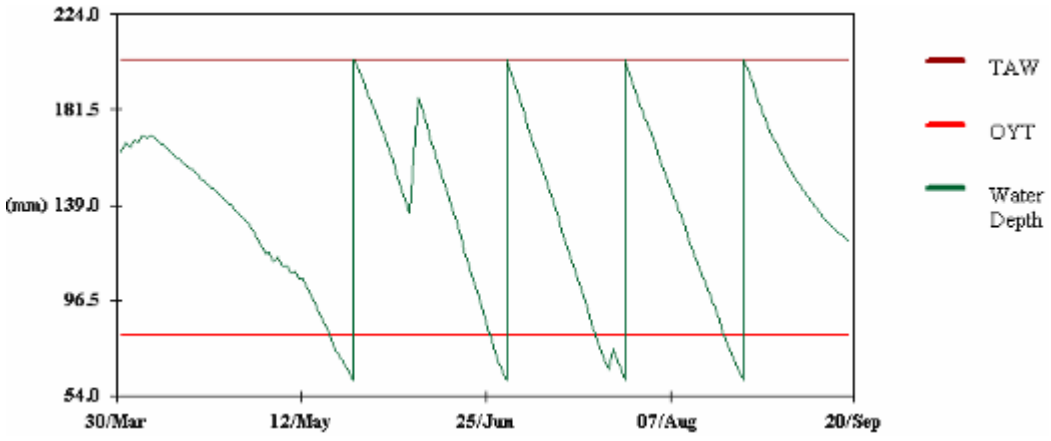


Рис. 3. Пример динамики почвенной влажности при дефицитном режиме орошения хлопчатника, принимая MAD = 0,75, Голодная степь, 1986

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 «Толойкон» 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).

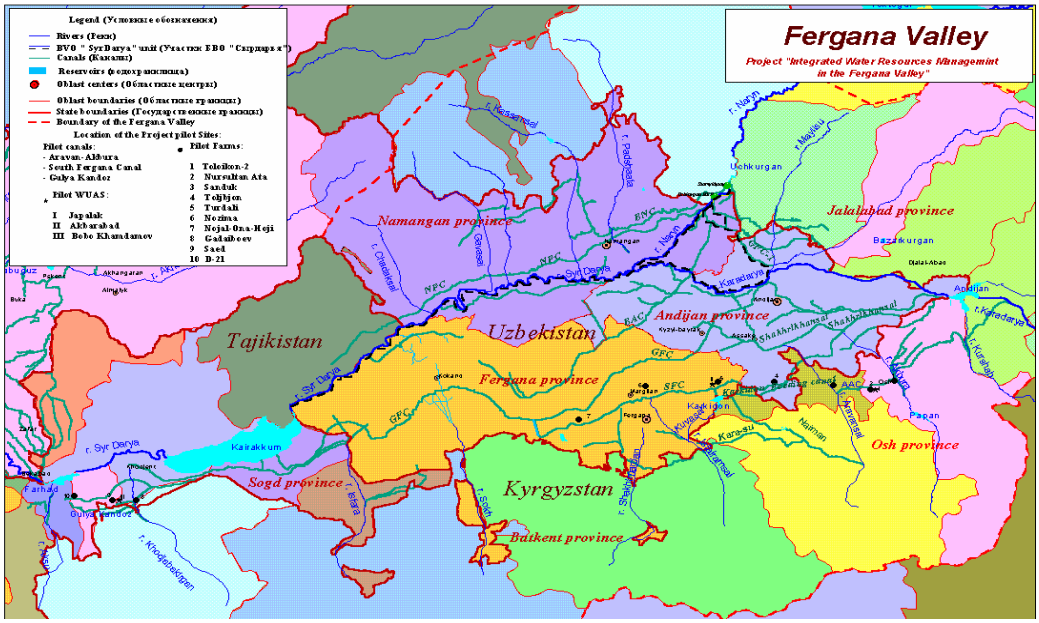

Fergana Valley
Project "Integrated Water Resources Managemint in the Fergana Valley"
Legend (Условные обозначения)
Rivers (Реки)
Canals (Каналы)
Reservoirs (водохранилища)
Oblast centers (Областные центры)
Oblast boundaries (Областные границы)
State boundaries (Государственные границы)
Boundary of the Fergana Valley
Location of the Project pilot Sites:
Pilot canals:
- Aravan- Alibura
- South Fergana Canal
- Gulya Kandoz
Pilot WUAS:
I Japalak
II Akbarabad
III Bobo Khamdamov
Pilot farms:
1 Toleikon-2
2 Nursultan Ata
3 Sandyk
4 Toghjon
5 Turdali
6 Nozima
7 Nojal-Ona-Moji
8 Gadaibeev
9 Saeli
10 D-21
Namangan province
Jalalabad province
Andijan province
Fergana province
Osh province
Sogd province
Batken province
Tajikistan
Uzbekistan
Kyrgyzstan
Kaisakkum
r. Syr Darya
Uchkurgan
Bazarkurgan
Andijan
Pagan
Farhad
Gulya Kandoz
r. Khodabeldigan
r. Naryn
r. Kara-Daria
r. Chirchik
r. Padsha-ata
r. Sokh
r. Isfara
r. Vakhsh
r. Kizil-Suu
r. Kara-Suu
r. Shakhrikhansai
r. Kasansai
r. Kurshab
r. Kuvasai
r. Shakhimardan
r. Kara-Daria
r. Kara-Tal
r. Kara-Kul
r. Kara-Tau
r. Kara-Kul
r. Kara-Tal
r. Kara-Daria

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

Хозяйство Азизбек-1 (Ферганская область), 2001-2002					
	Посадка	*Мерзлая почва*	*Развитие*	*Середина.сезона*	*Конец сезона*
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.

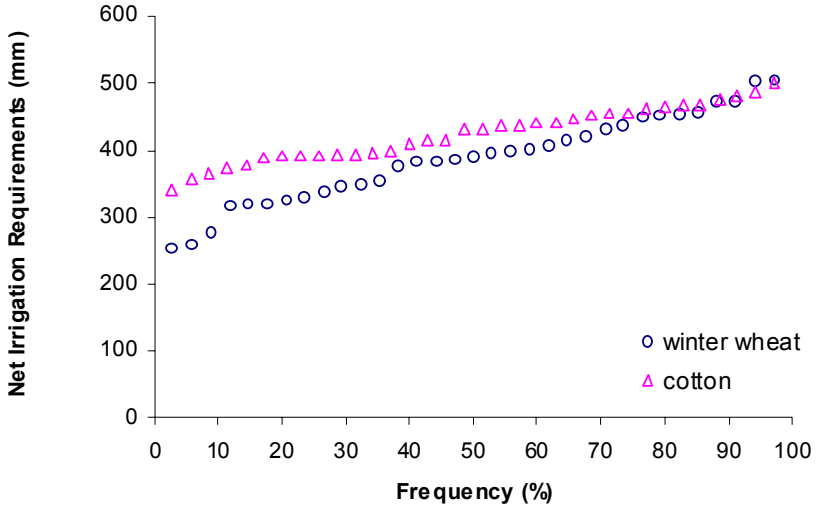


Рис. 5. Потребности в орошении (нетто) для хлопчатника
и озимой пшеницы, Фергана (1970-2003)

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 $ET_{c\ adj} = ET_c$. 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 эвапотранспирация сельхозкультуры ($ET_{c\ adj}$) меньше, чем потенциальная эвапотранспирация (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	

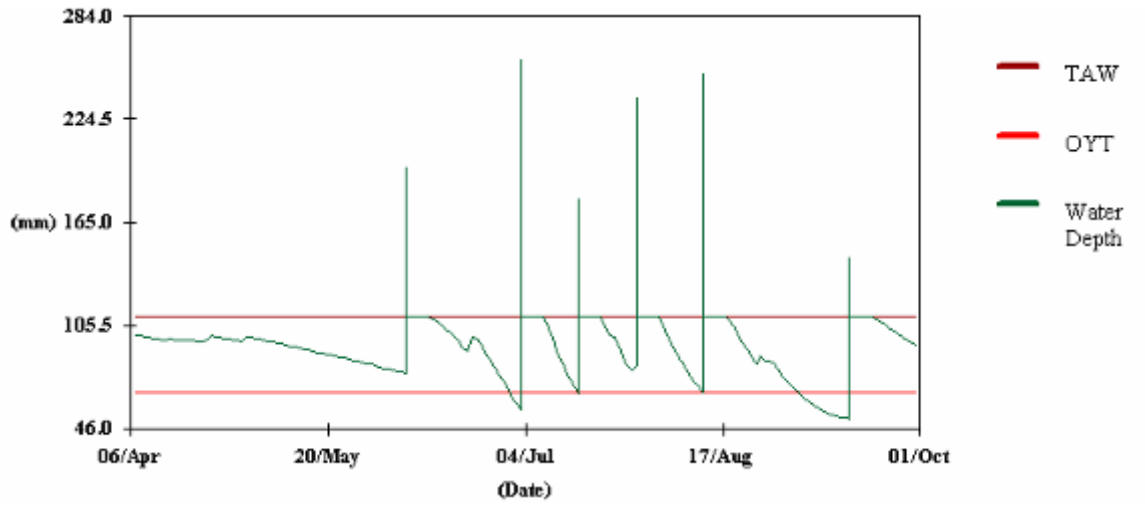


Рис. 6. Типичный текущий график полива хлопчатника, демонстрирующий избыточную подачу воды и сопутствующую фильтрацию, хоз-во «Азизбек-I», Ферганская область, 2001

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	***Ферганская область, 2001***		***Ошская область, 2003***	
	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	***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	
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 удается 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	
TAW (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	***Ферганская область***		***Ошская область***	
	Сроки	Нормы (мм)	Сроки	Нормы (мм)
Поливы после сева	10 окт 16 фев 08 марта 20 апр	163 119 130 137	1 окт 20 мая	124 141
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	

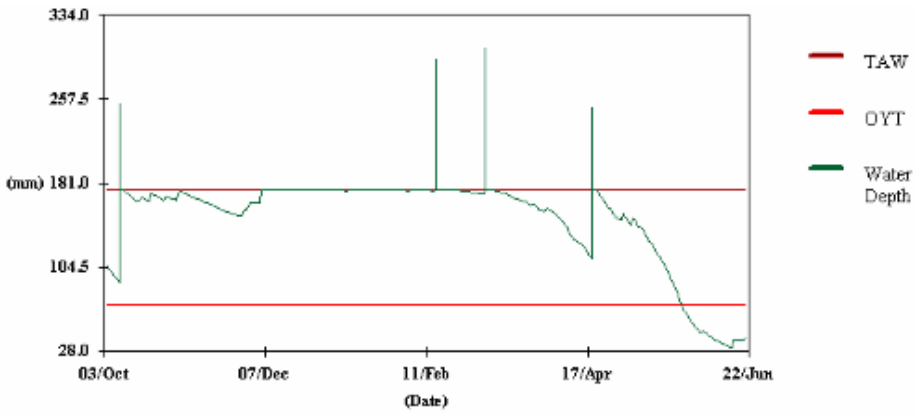


Рис. 7. Динамика почвенной влажности для типичного текущего режима орошения с избыточной подачей воды и возникновением фильтрации в хозяйстве «Азизбек-1» Ферганской области

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***	
Поливы после сева	Сроки	Норма (мм)	Сроки	Норма (мм)
	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	

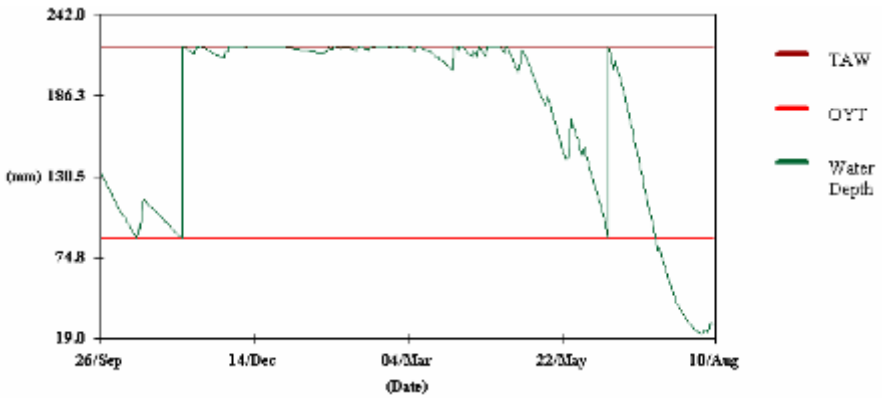


Рис. 8. Динамика почвенной влажности для улучшенного графика орошения озимой пшеницы, нацеленного на водосбережение, отсутствие фильтрации и максимальную урожайность, на примере хозяйства «Толойкон» в Ошской области

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	***Ферганская область***		***Ошская область***	
Поливы после сева	Сроки	Норма (мм)	Сроки	Норма (мм)
			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	

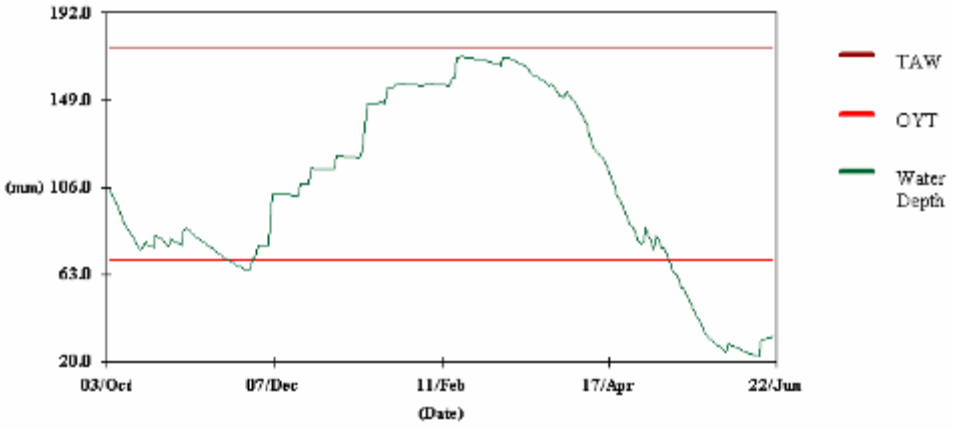


Рис. 9. Пример динамики почвенной влажности при выращивании
озимой пшеницы с использованием режима дефицитного орошения
(MAD = 0,75) в хозяйстве «Азизбек-1» Ферганской области в богарных условиях

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. Гидромодульное 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 Nº 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 ЦЕЛЬЮ КАЛИБРОВКИ МОДЕЛИ «RZWQM» ДЛЯ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ

Г.В. Стулина[15], М.Р. Камейра[16]

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 анализируется 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 Сырдарьи. 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 Сырдарьи. 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 дрен 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. Среднемноголетняя 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.

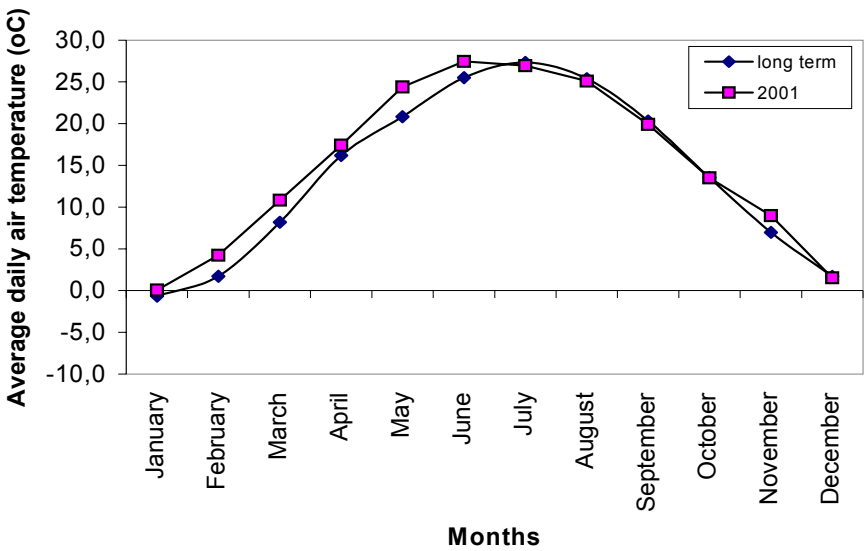


Рис.1. Температура воздуха: средние значения для периода 1970-2000 гг. и значения 2001 г. Ферганская метеорологическая станция

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/см^3, 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 HCO_3 (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 $Ca(HCO_3)_2$, $CaSO_4$ (растворимый гипс), $MgSO_4$, Na_2SO_4, и NaCl. Большая часть солей представлена нетоксичным соединением $CaSO_4$, 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 соответствие 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 $N–NH_4$ 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 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, [θ (h)] были определены в полевых условиях с

помощью почвенного монолита (2 х 2 х 2 м), расположенного на экспериментальном участке, согласно методике, описанной в работе Cameira 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:

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

где: $\boldsymbol{\varphi_w}(z,t)$ – 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:

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

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 $\boldsymbol{\varphi_w}(z,t)$ 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.

После этого, применяя уравнение Дарси, рассчитывается гидравлическая проводимость. Процедура расчетов показана на рисунке 4.

Определенная в поле кривая матричного потенциала всасывания была дополнена за счет использования значений, полученных лабораторным способом при применении двух различных методов исследований: метода мембранного пресса (pF >2, где pF = log (h) в см) (Klute, 1986 г.) и метода десорбции (Вадюнина и Корчагина, 1973 г.), который используется в Московском университете (при pF 6,466; 5,955; 5,742; 5,512; 5,318 и 4,445). Для лабораторных исследований, образцы почв с ненарушенной структурой (100 см^3) были отобраны на экспериментальном участке.

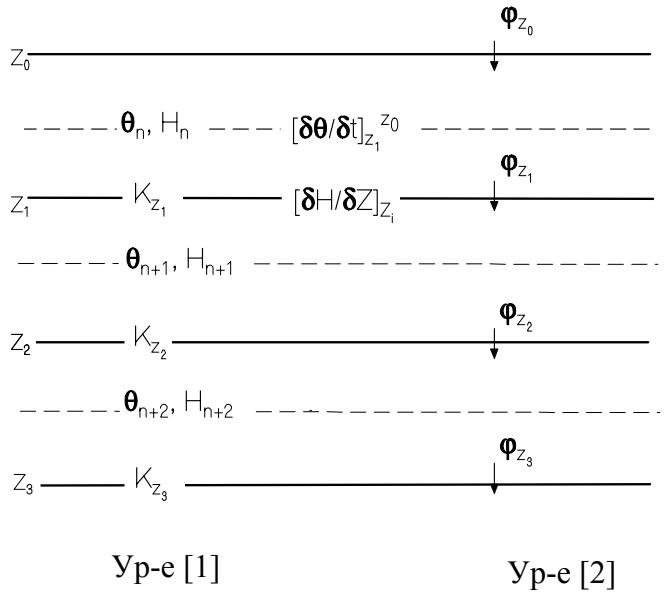


Рис. 4. Порядок расчета гидравлической проводимости, используя данные эксперимента с почвенным монолитом

Зависимости Brooks и Corey (1964 г.), модифицированные как описано в ранее упоминавшейся работе (Ahuja и др.,1999 г.), были откорректированы согласно экспериментальным данным для определения θ(h) и K(h). Эти зависимости основываются на следующем:

- Зависимость содержания почвенной влаги, θ (см^3 см$^{-3}$) от гидростатического напора в почве, h (см) представляется следующими уравнениями:

$$\theta(h) = \theta_s - A|h| \qquad 0 \leq |h| \leq |h_b| \qquad [3a]$$

$$\theta(h) = \theta_r + B|h|^{-\lambda} \qquad |h| \leq |h_b| \qquad [3b]$$

где: θ_s – влажность насыщенной почвы, θ_r – остаточная влажность, h_b, A, B и λ - коэффициенты, полученные на основе экспериментальных данных.

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

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

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

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 моделированиями, 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 5x6 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 (вначале 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 биомассы 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(□). 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.).

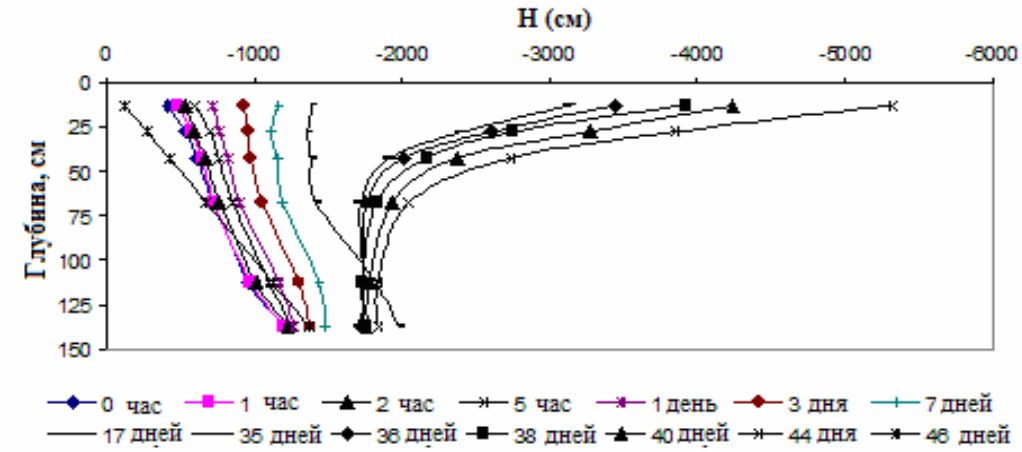


Рис. 5. Динамика профилей гидростатического напора
в опыте по дренированию монолита

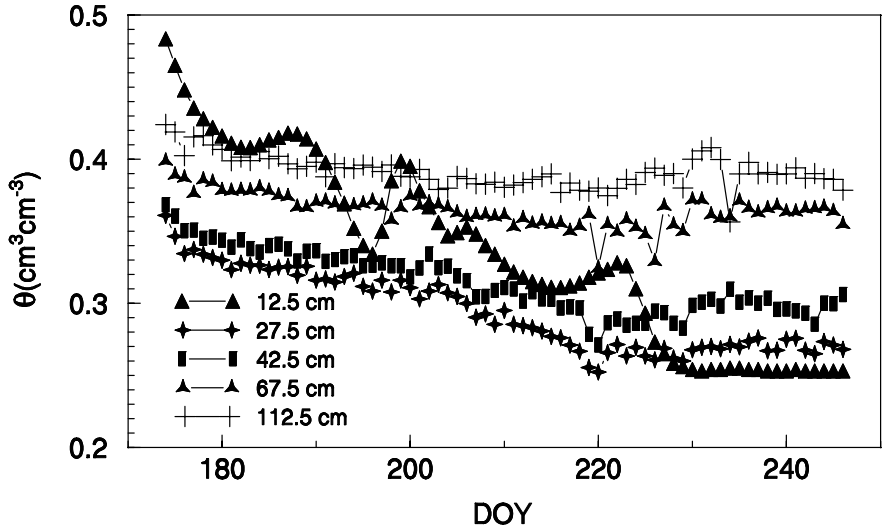


Рис. 6. Динамика влажности почв на пяти глубинах
в ходе эксперимента с монолитом

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.

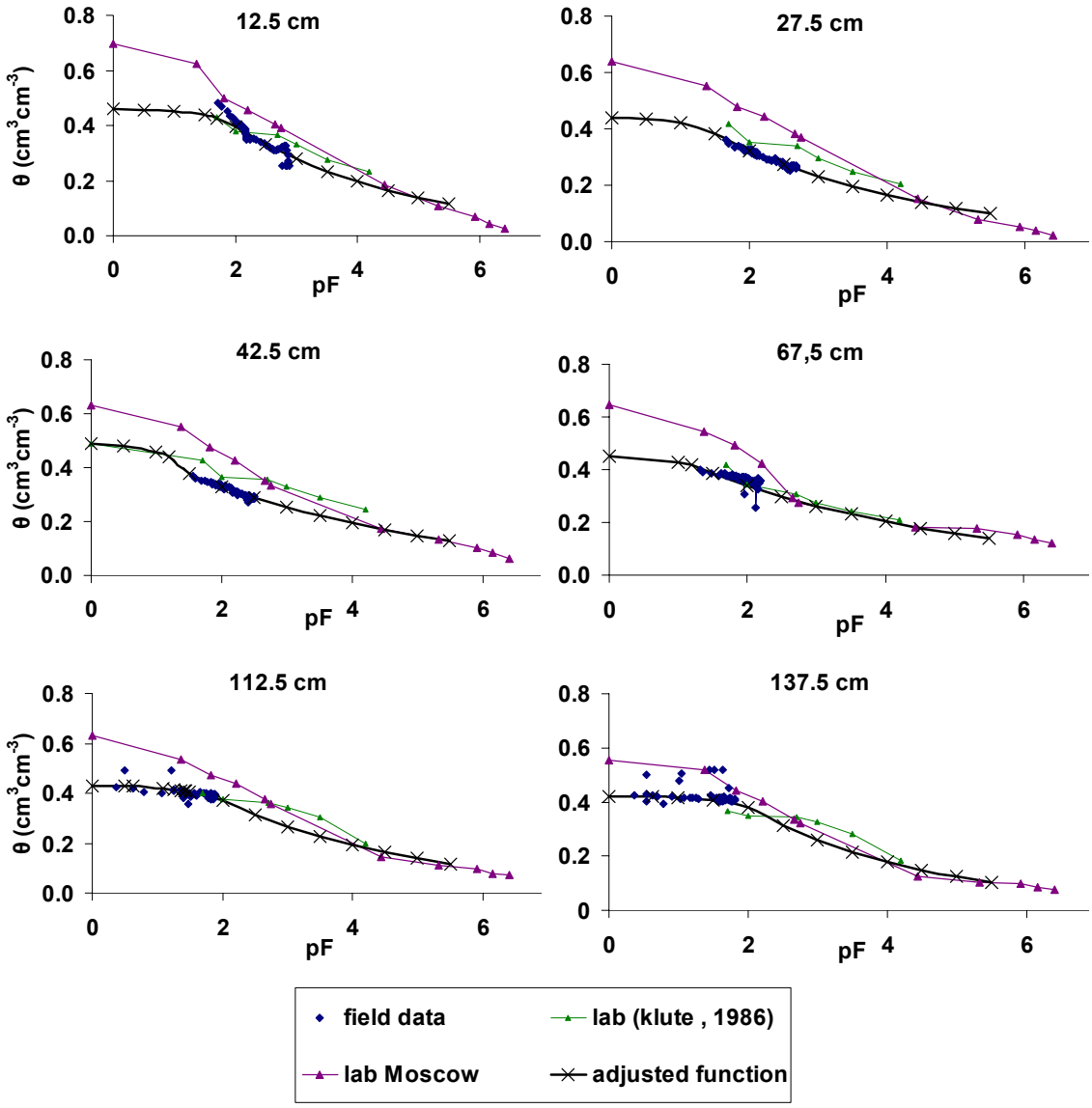


Рис. 7. Кривые водоудержания, рассчитанные по различным методикам

На рисунке 9 показаны зависимости гидравлической проводимости Брукса и Кори, откорректированные согласно полевым данным. Из-за отсутствия значений для диапазона pF> 3, зависимости были откорректированы на основании только измерений во влажной зоне, что более важной 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 pF выше «пузырькового» давления, кривые весьма похожи для всех глубин, указывая на низкую открытую порозность и высокую водоудерживающую способность.

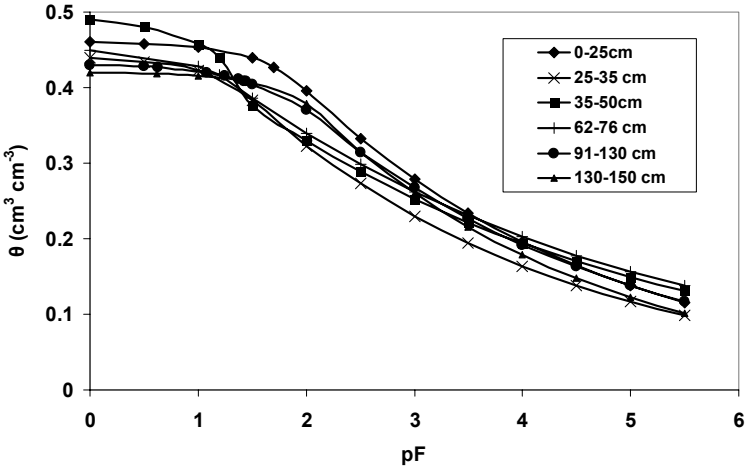


Рис. 8. Последний вариант кривых зависимости водоудержания на основе зависимостей Brooks и Corey

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.

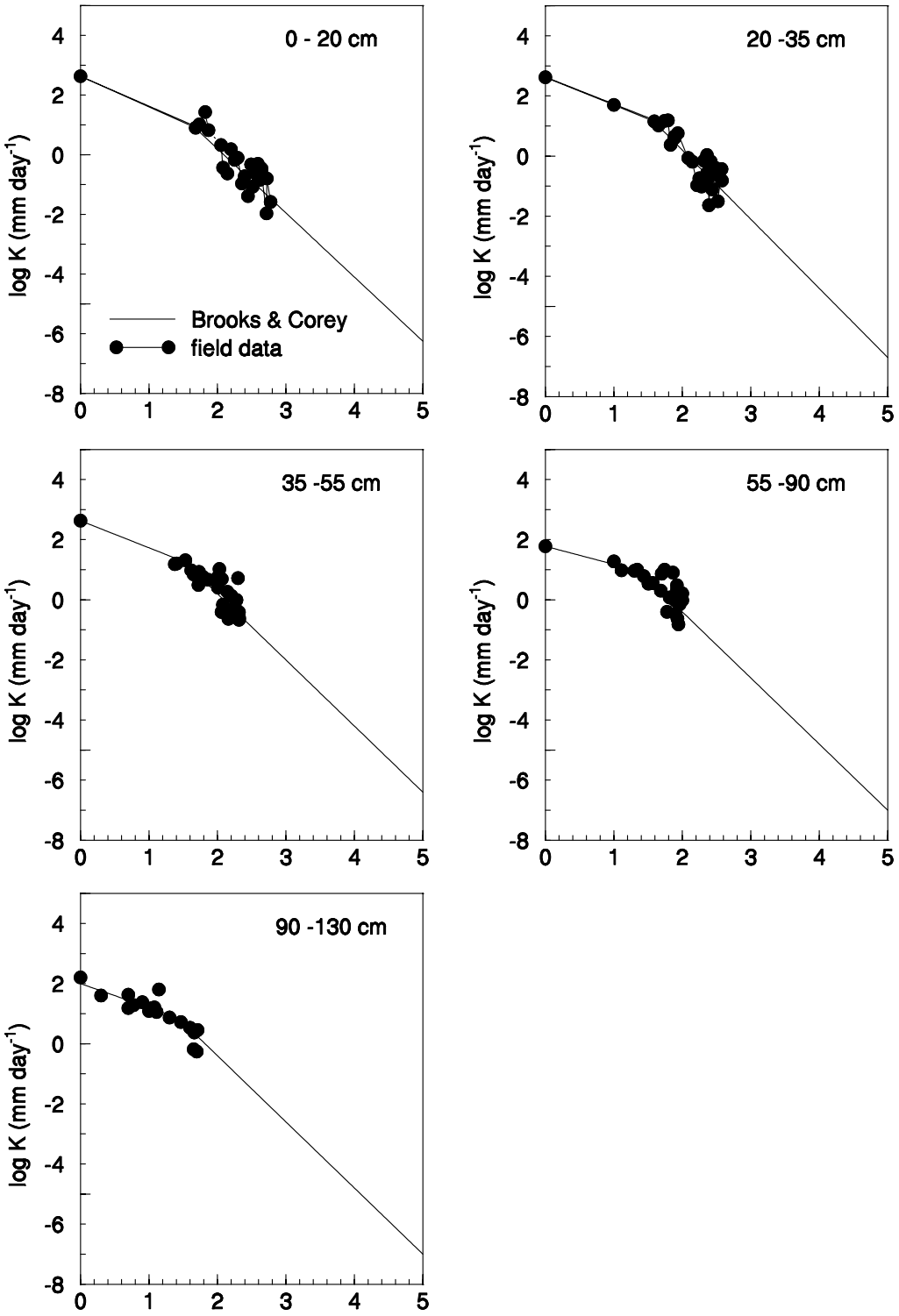


Рис. 9. Зависимости Brooks и Corey, откорректированные согласно полевым данным по гидравлической проводимости

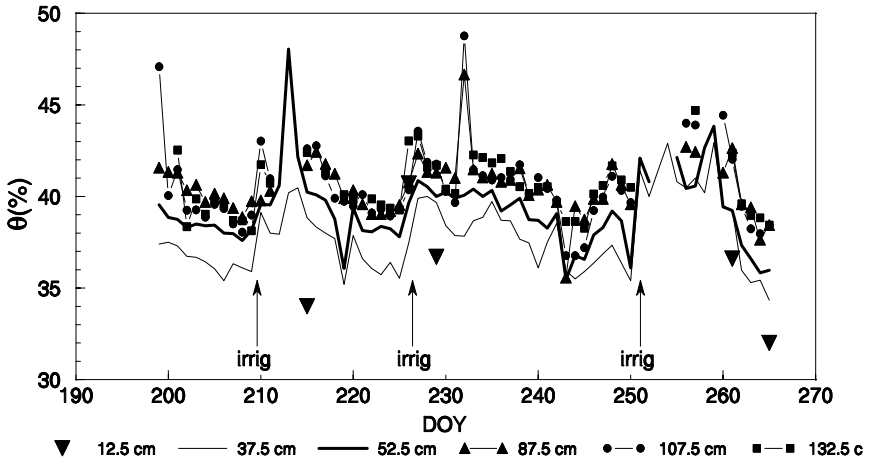


Рис. 10. Замеренные значения влажности почв в период с 18 июля (199 день) до 22 сентября (265 день)

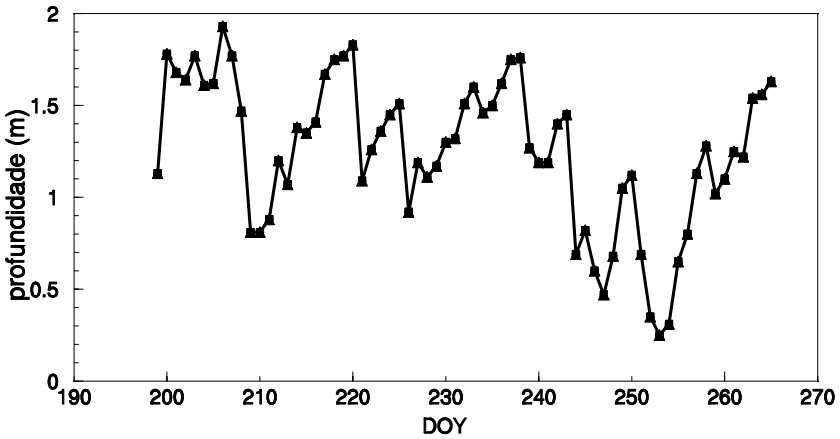


Рис. 11. Глубина залегания грунтовых вод (м) в вегетационный период

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.

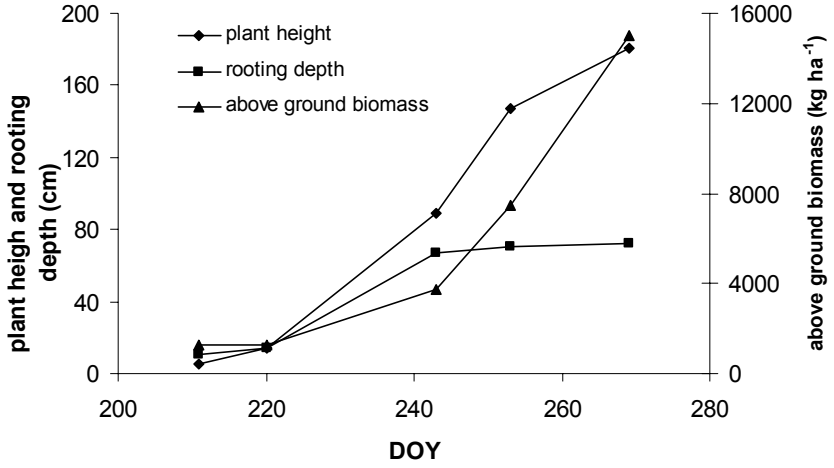


Рис. 12. Развитие кукурузы

Заключение

Определение водно-физических свойств почвы было выполнено с целью уточнения вводных 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. Стулина[17], М.Р. Камейра[18], Л.С. Перейра[18]

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 натурных 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 ее 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 исследования 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 листьевой 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 листьевой 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)	θs ($м^3$ $м^{-3}$)	θr	Ks (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.

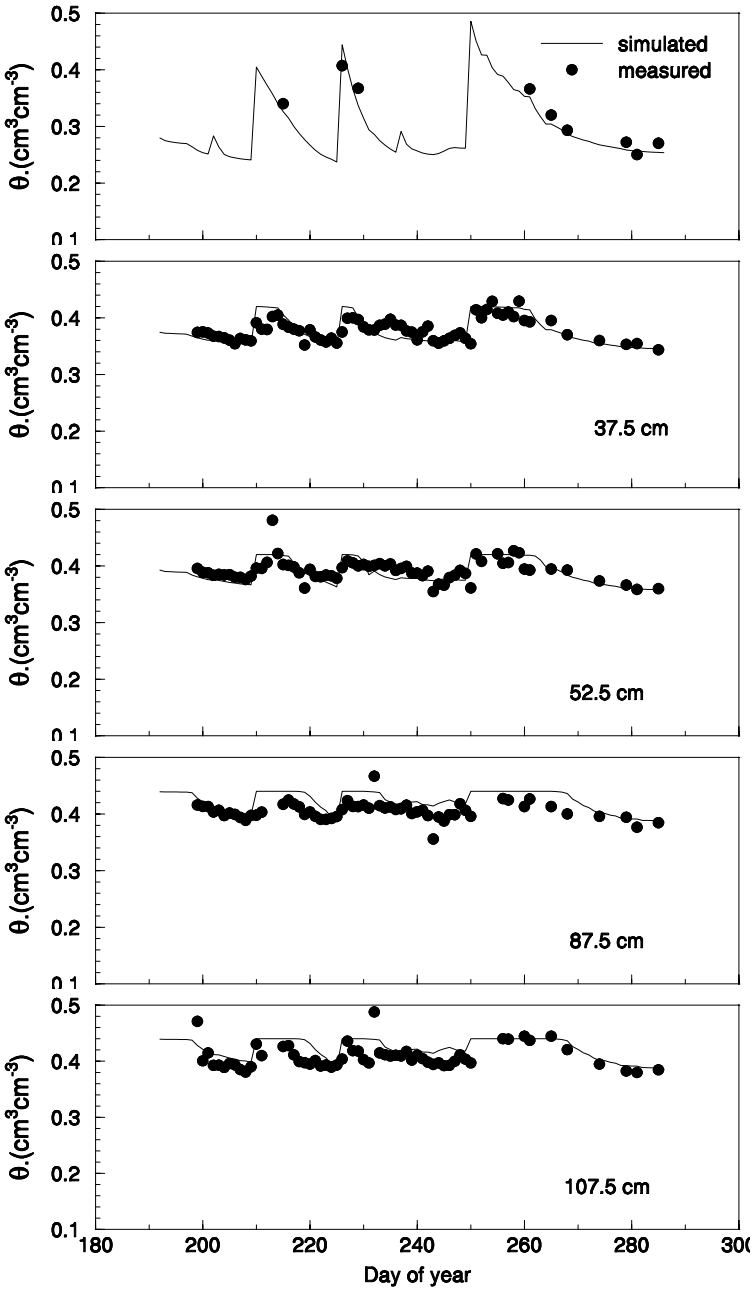


Рис. 1. Сравнение фактических данных по влажности почвы
с расчетными данными, после калибровки гидравлических характеристик
в компоненте модели

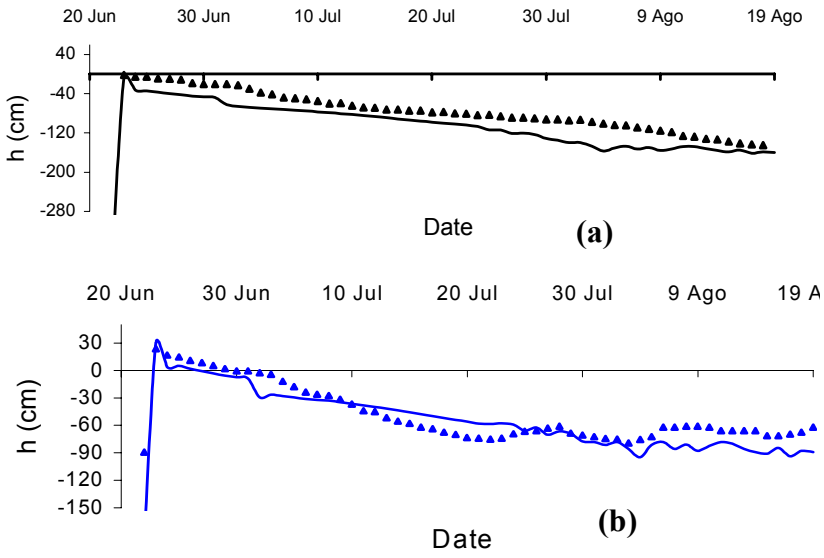


Рис. 2. Сравнение величин матричного потенциала почв фактически замеренных и расчетных (см) на двух глубинах: (a) 88 см и (b) 113 см

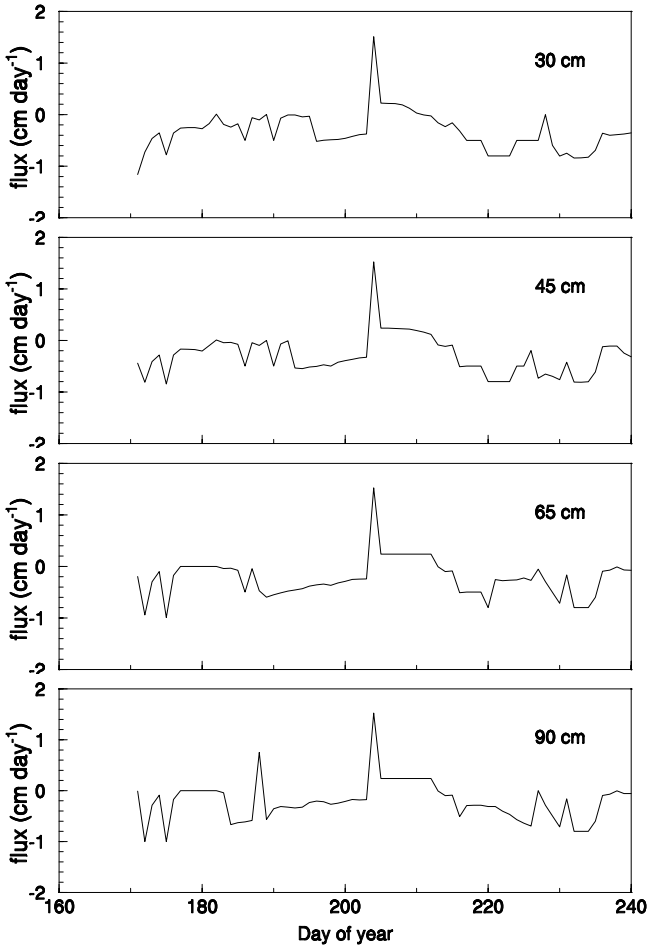


Рис. 3. Расчетные потоки влаги на различных глубинах

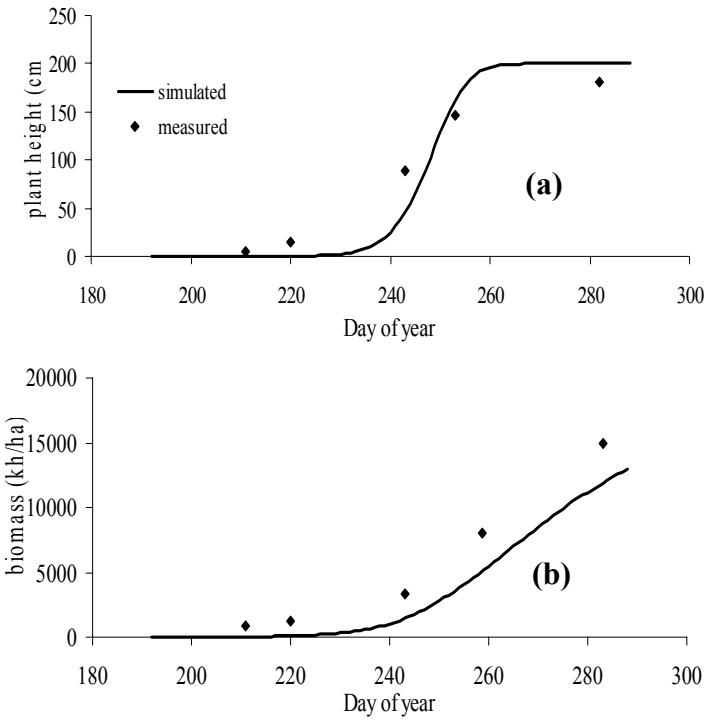


Рис. 4. Расчетная и фактическая высота растений (a) и биомасса (b) кукурузы, выращиваемой на силос

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 A1 – комбинированный способ, сценарий A2 – разбрасывание по поверхности почвы и сценарий A3 – 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.

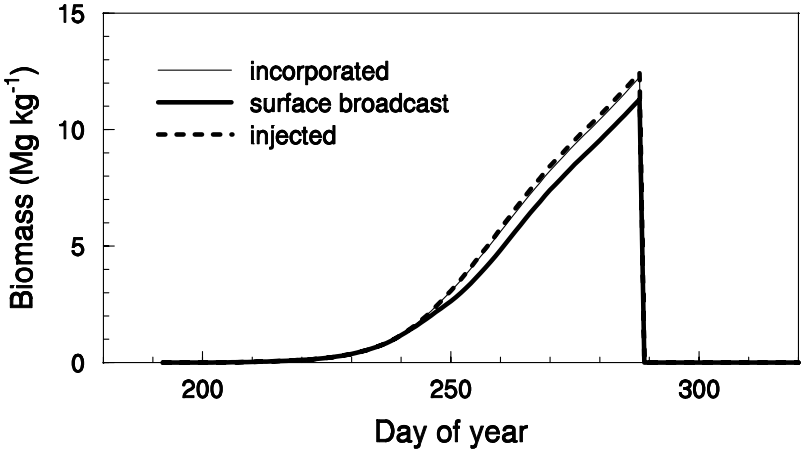


Рис. 5. Результаты моделирования накопления биомассы кукурузой при различных способах внесения азотных удобрений в почву

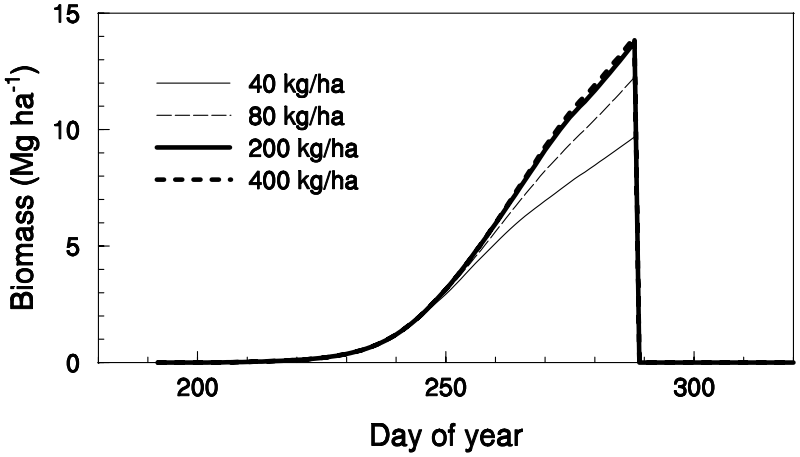


Рис.6. Результаты моделирования накопления биомассы кукурузой при различных нормах внесения азотных удобрений в почву

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.

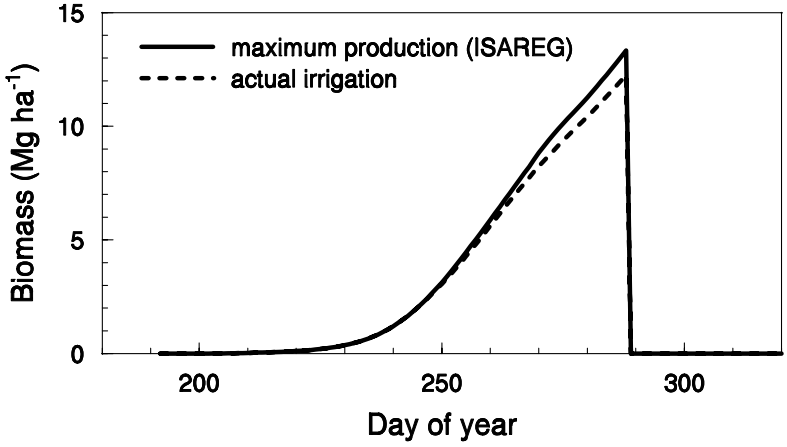


Рис.7а. Суммарная биомасса кукурузы (кг/га) при улучшенном режиме орошения в сравнении с обычной практикой орошения

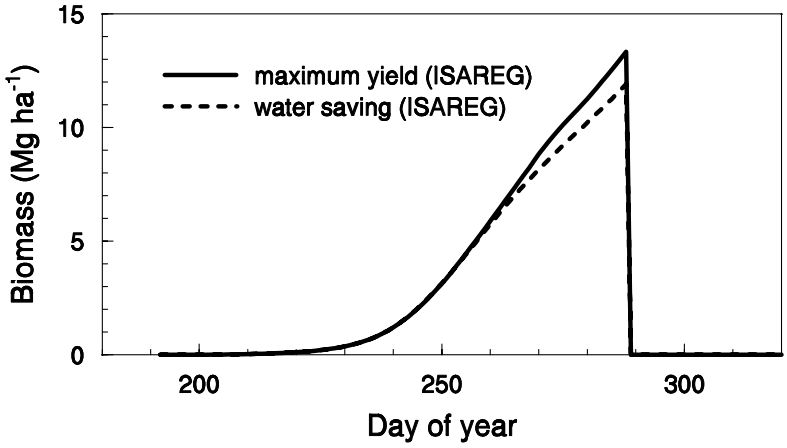


Рис 7b. Расчетная биомасса кукурузы (кг/га) при водосберегающем сценарии орошения и сценарии улучшенного режима орошения

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 NO_3-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. Кулов[19], А.Ж. Атаканов[19], П.М. Жоошов[19], Н.Ж. Шаршекеев[19]

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).

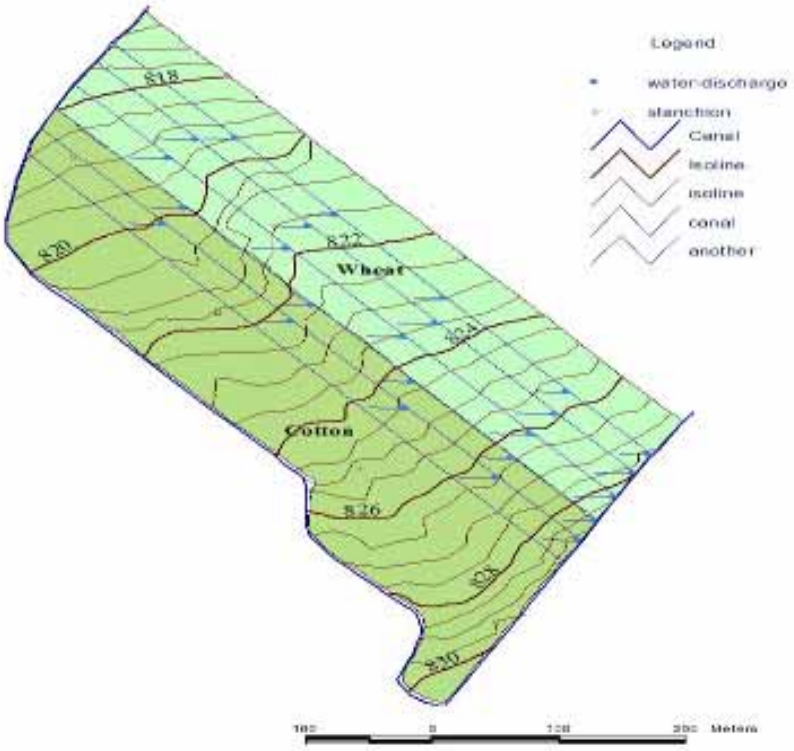
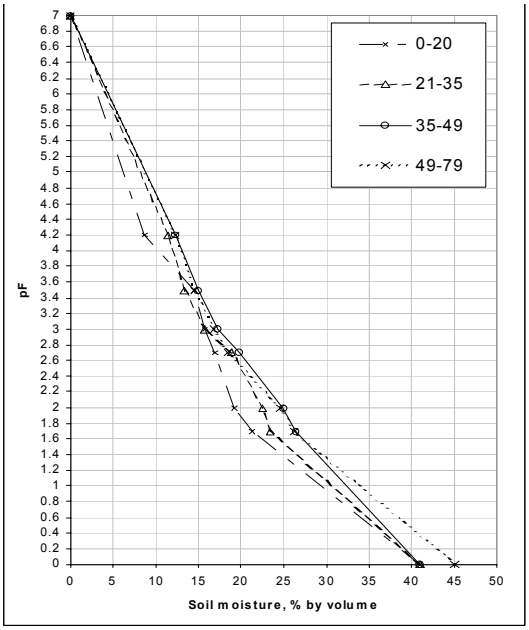


Рис. 1. Схема пилотного участка

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 pF
(шурф # 2, поле #1 с хлопчатником, Карасуйский район)

Почвенный профиль		Объемный вес (г/см^3)	Пороз-ность (%)	Влажность почвы (% от объема) при различных pF						Общее содержание доступной влаги TAW (мм)
	Слой (см)			1,7	2,0	2,7	3,0	3,5	4,2	
А 0	0-32	1,35	49	20,39	17,03	15,89	14,90	12,51	6,11	109
А	33-42	1,51	43	30,31	28,15	27,16	24,89	21,43	15,89	123
А-В	42-63	1,46	45	31,62	28,48	27,17	26,20	22,41	15,68	128
В 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
В 2	126-150	1,44	46	27,92	23,58	22,18	20,67	15,47	10,03	136
В - 5	150-178	1,44	46	26,77	24,48	24,40	22,19	16,28	11,04	134
В - 6	178-200	1,42	47	26,20	22,22	23,31	19,72	13,29	9,20	130



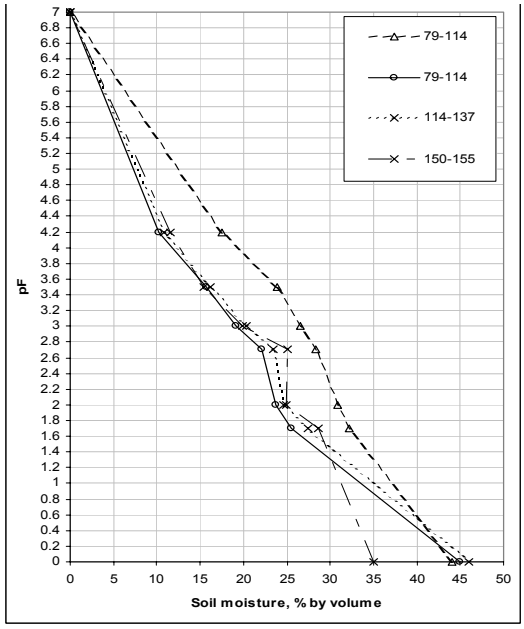


Рис. 2. Кривые удержания почвенной влаги при различных pF
(шурф #1, поле с озимой пшеницей, Карасуйский район)

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.

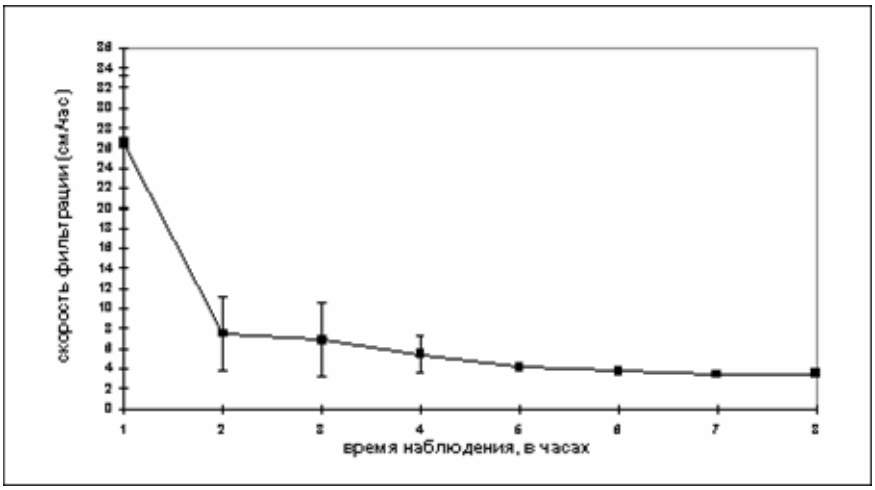


Рис. 3. Интенсивность инфильтрации на почвах поля №1

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.

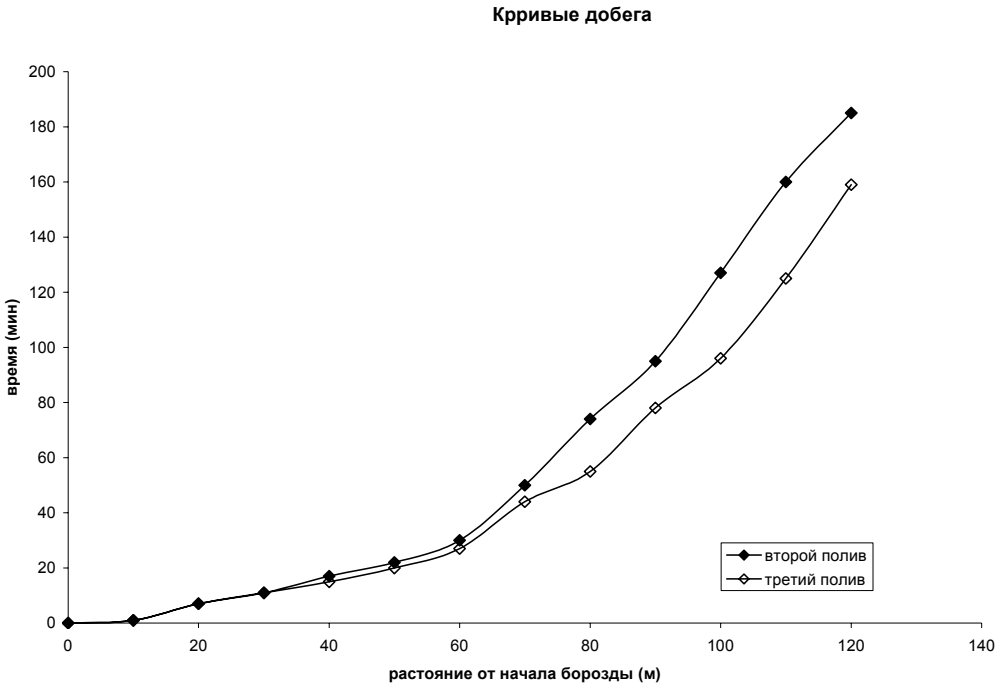


Рис. 4. Кривые добегания поливных струй на втором и третьем поливах, вариант 1.9

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

Вариант	Длительность добега (мин)		Спад (мин)	Длительность водоподачи (мин)	Водоподача ($м^3$/га)	Сброс ($м^3$/га)	Инфильтрация ($м^3$/га)	Q av. водоподачи (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 водоподачи 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.

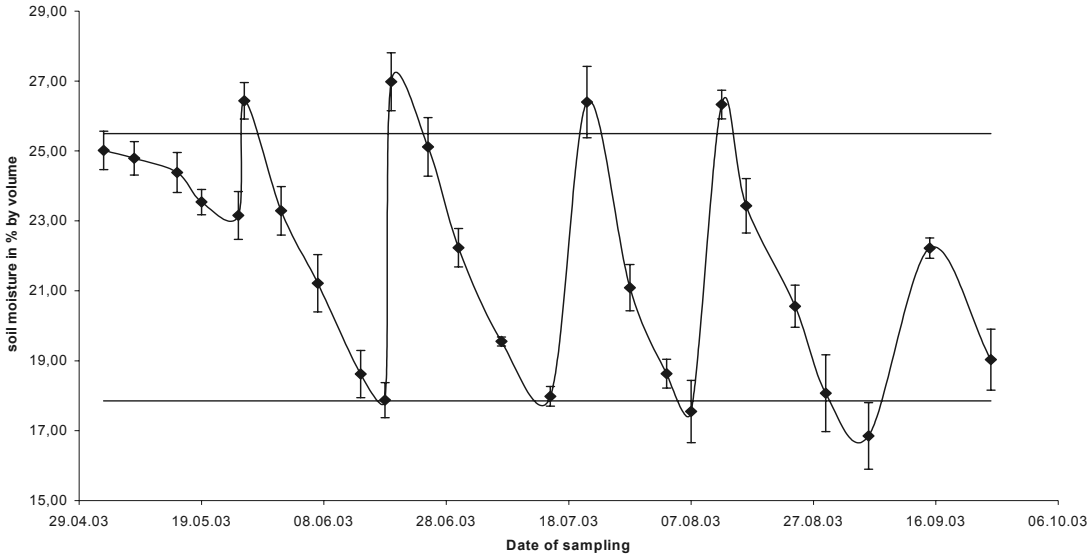


Рис. 5. Динамика изменения влажности почвы на поле с хлопчатником в период вегетации, 2003 г.

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.

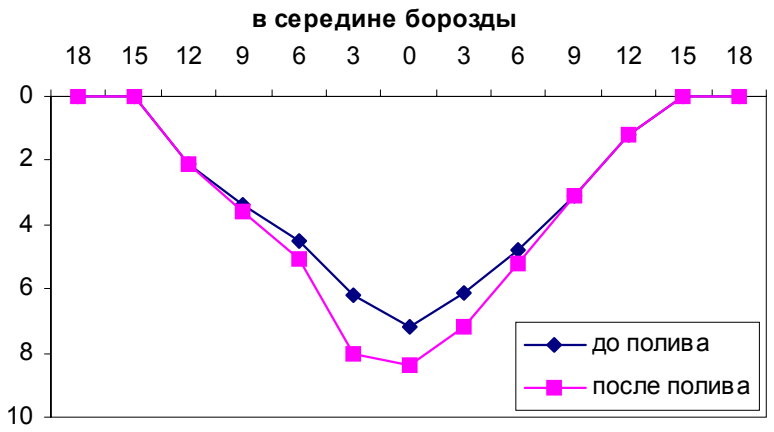


Рис. 6. Поперечный профиль борозды до и после полива

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 водоподачи 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 м^3/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 значение эксплуатационных потерь воды на орошаемых полях при существующем поверхностном поливе

Водопронцаемость 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) Q (л/с)	50 0.22	80 0.35	110 0.50	180 0.80	200 0.90	150 0.70
Повышенная водопроницаемость	L (м) Q (л/с)	80 0.18	110 0.24	140 0.30	220 0.48	250 0.55	200 0.45
Средняя водопроницаемость	L (м) Q (л/с)	110 0.13	135 0.15	160 0.18	260 0.30	300 0.35	250 0.30
Пониженная водопроницаемость	L (м) Q (л/с)	135 0.08	160 0.09	185 0.11	300 0.18	350 0.20	300 0.18
Слабая водопроницаемость	L (м) Q (л/с)	150 0.05	180 0.06	210 0.08	350 0.12	400 0.15	350 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	025	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. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1966

Справочник по климату СССР, Киргизская ССР, вып. 32, часть 4. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1969

Агроклиматические ресурсы Ошской области Киргизской ССР. Гидрометеоиздат, 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. Нерозин[20]

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-I», расположенного в Ахунбабаевском районе Ферганской области (Узбекистан), где выращивались хлопчатник и озимая пшеница. Выбранные участки были оснащены измерительным оборудованием, для каждого поля был составлен агромелиоративный 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 урожайнстью. 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 привела 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.м^3 на 1 тонну хлопка-сырца и 3,17 тыс.м^3 на 1 тонну зерна пшеницы (таблица 3), самые низкие затраты воды при возделывании хлопчатника отмечены в Ферганской области - 3,15 тыс.м^3/т, а при возделывании озимой пшеницы в Андижанской области - 0,84 тыс.м^3/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.м^3, а наименьшая в Согдийской области – 0,12 т/тыс.м^3 (таблица 4). При возделыва-

нии озимой пшеницы наибольшая продуктивность оросительной воды отмечена в Андижанской области – 1,19 т/тыс.м^3, а наименьшая продуктивность оросительной воды в Согдийской области - всего 0,32 т/тыс.м^3.

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 слеьхозкультур 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 dS/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/м^3).

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 фемерском 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 среднезасоленным в подпахотном слое, в составе ионов преобладают Ca и SO_4, 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-NH4 (мг/кг)	P2O5 (мг/кг)	K2O (мг/кг)
Хлопчатник	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 $N\text{-}NH_4$ 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-I» 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 агроэкрономическом 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 подпахтного (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.

Получение запланированного уровня урожая во многом зависит от правильного внесения органических и минеральных удобрений в вегетационный период. Знание степени обеспеченности поля гумусом, растворимыми формами азота, фосфора и калия позволяет назначить обоснованную норму вносимых удобрений и одновременно добиться выравнивания уровня плодородия по всему полю.

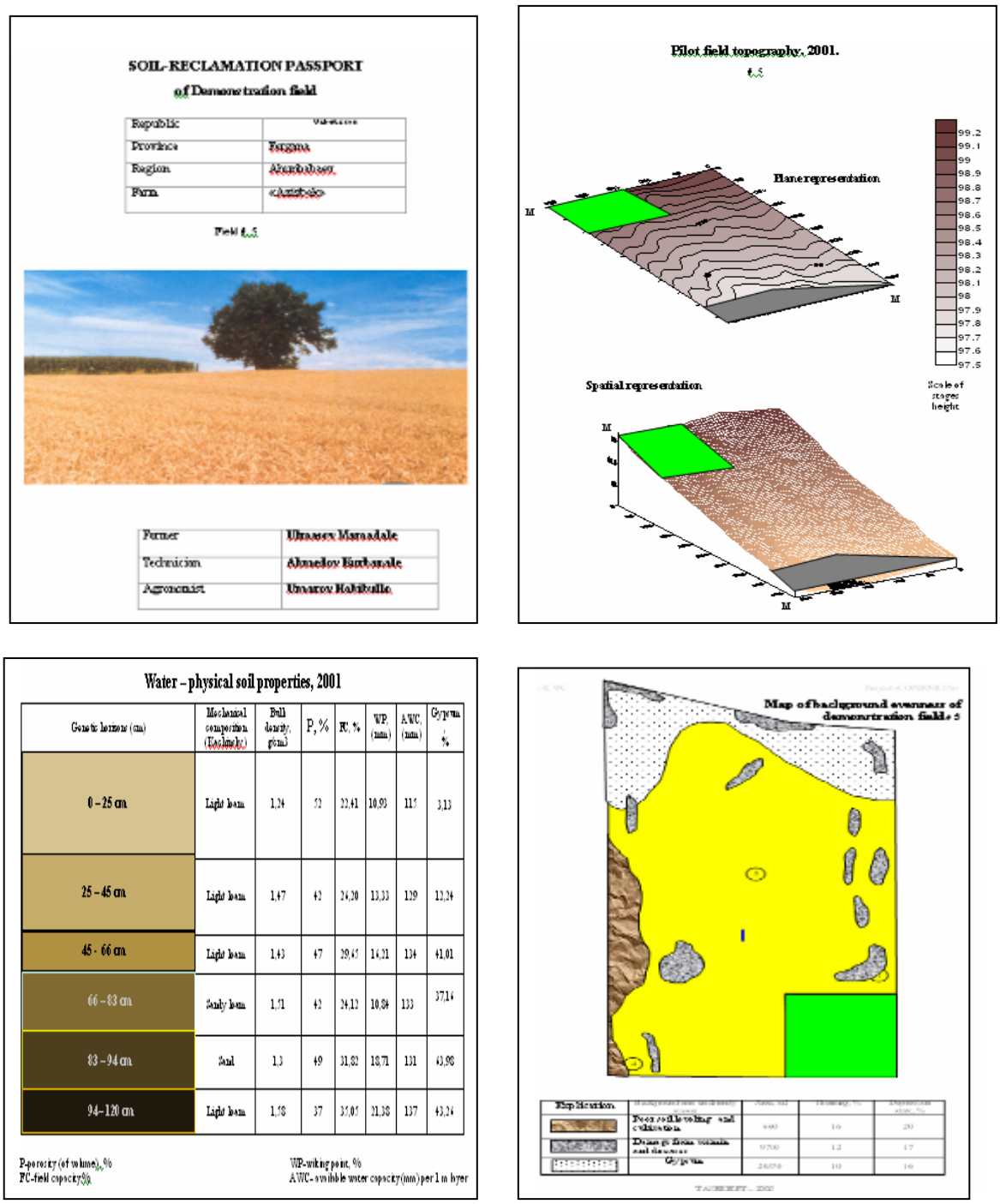


Рисунок 1. Отдельные страницы агромелиоративного паспорта поля фермерского хозяйства «Азизбек»

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 поконтурно 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):

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

где $\sum Q_{фар}$ - приход фотоактивной радиации за вегетационный период, ккал/см^2;
q - калорийность урожая, ккал/кг;
ηф - коэффициент полезного действия фотосинтеза, %;
К - 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_2O_5	7	9
Потери от недостатка K_2O	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 P_2O_5 (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 невосоким 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 потребные 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 галечникого горизонта, длиной оросительных борозд, залеганием уровня грунтовых вод, а также не отвечающими требованиям сроками и нормами поливов.

Исследования 2003 года, проведенные в фермерском хозяйстве «Азизбек-I» 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-I» (2003 год)

Показатели	Хлопчатник	Пшеница
Удельная водоподача брутто ($м^3$/га)	7268	7193
Потери на сброс ($м^3$/га)	741	986
Потери на фильтрацию ($м^3$/га)	729	720
Удельная водоподача нетто ($м^3$/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-I» (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	30,2

В 2003 году по сравнению с 2002 годом снизилась валовая водоподача на поле с хлопчатником на 2300 $м^3$/га и на поле с озимой пшеницей - на 1832 $м^3$/га, существенно снизились затраты воды на единицу продукции (по хлопчатнику на 0,25 $м^3$/кг, по пшенице на 0,40 $м^3$/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 подавае-

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 урожаев, 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 агромелиоративного паспорта поля;
- Расчет уровней продуктивности сельхозкультуры;
- Оценка потерь в урожайности сельхозкультуры от влияния различных факторов;
- Оценка возможностей фермера (финансовые, технические, технологические) управлять факторами, обусловливающими 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.

Глава13.

ОЦЕНКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ БОРОЗДКОВОГО ПОЛИВА И ВОДОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ ХЛОПЧАТНИКА

М.Г.Хорст[21], Ш.Ш.Шамуталов[21], Д.М. Гонсалвес[22], Л.С.Перейра[22]

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
A	1	130	0,0025	2,4	уплотненная	Полив в каждую борозду	Обычный
	2			1,8	уплотненная		
	3			1,2	уплотненная		
	4			1,8	неуплотненная		
B	5	400	0,0020	2,4	уплотненная	Полив в каждую борозду	Обычный
	6			1,8	уплотненная		
	7			1,2	уплотненная		
	8			1,8	неуплотненная		
C	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 «шохарыку», нарезаемому 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.

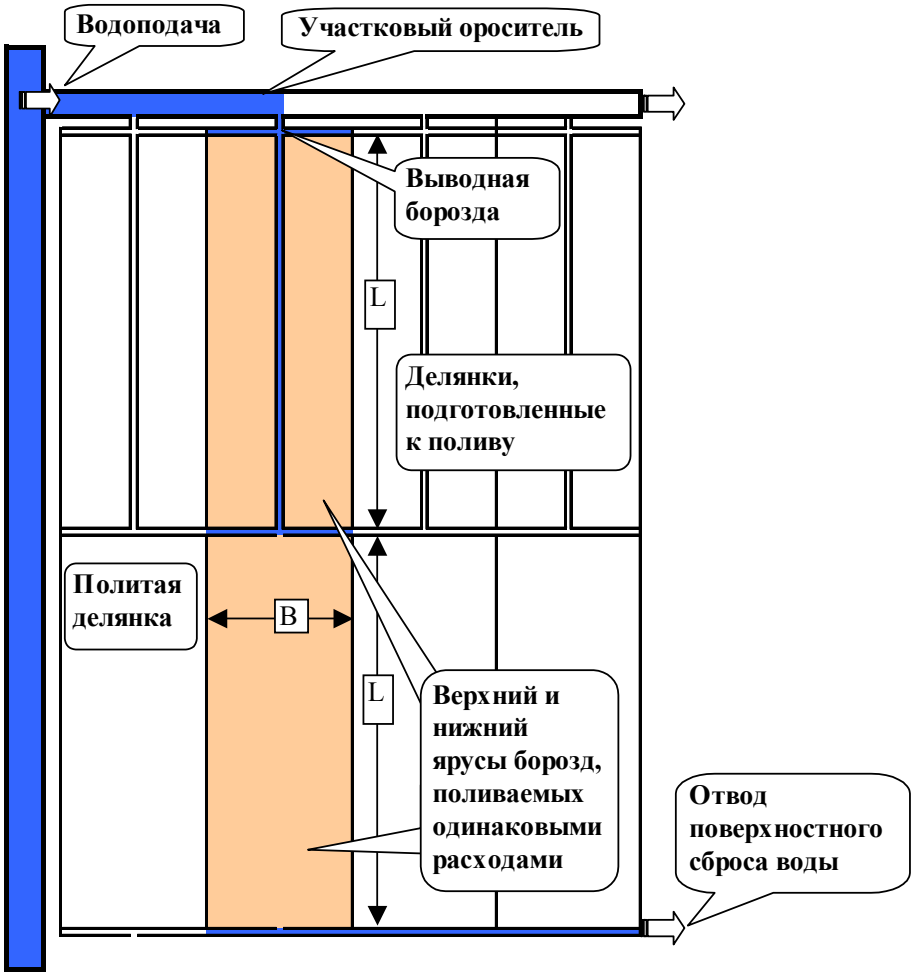


Рис.1. Схема многоярусного полива с повторным использованием сброса для полива последовательных групп борозд

Почвенные характеристики по 7 генетическим горизонтам, выбранным при обследовании почв, представлены в таблице 2. Объемный вес почвы (γ_d, г/см^3) 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	Пороз-ность	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:

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

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):

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

где y_i – наблюдаемые отметки (м); $\hat{y}$ – желаемая отметка (м) в той же точке i, соответствующая подогнанной 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):

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

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

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

и где t_i и t_{i-1} – время двух последовательных замеров расхода (мин), отсчитываемое с момента начала полива; Qi и Qi-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}:

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

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 впитывалось 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 ($м^{-1/3}$ с) рассчитывался из замеров площади поперечного сечения борозды, расхода, глубины потока и ширины поверхности воды по урезу:

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

где Q_{inf} - расход в борозду ($м^3$/с); A – площадь поперечного сечения борозды ($м^2$); 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):

$$Z = k\tau^{\alpha} + f_o\tau \qquad [7]$$

где Z – суммарная инфильтрация на единицу длины борозды ($м^3$/м); τ – эффективное время впитывания (мин); α и k – эмпирические параметры; и f_0 – эмпирическая основная скорость инфильтрации ($м^3$/мин/м). Параметры инфильтрации рассчитывались с использованием обратного метода (Katopodes 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:

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

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

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:

$$Z_i = k\left[(t_r)_i - (t_a)_i\right]^a + f_0\left[(t_r)_i - (t_a)_i\right] \qquad [10]$$

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_{lq} оценивался из среднего, для той четверти борозды, где инфильтрация была наименьшей.

Средний слой водоподачи D (мм) рассчитывался так:

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

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

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

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

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).

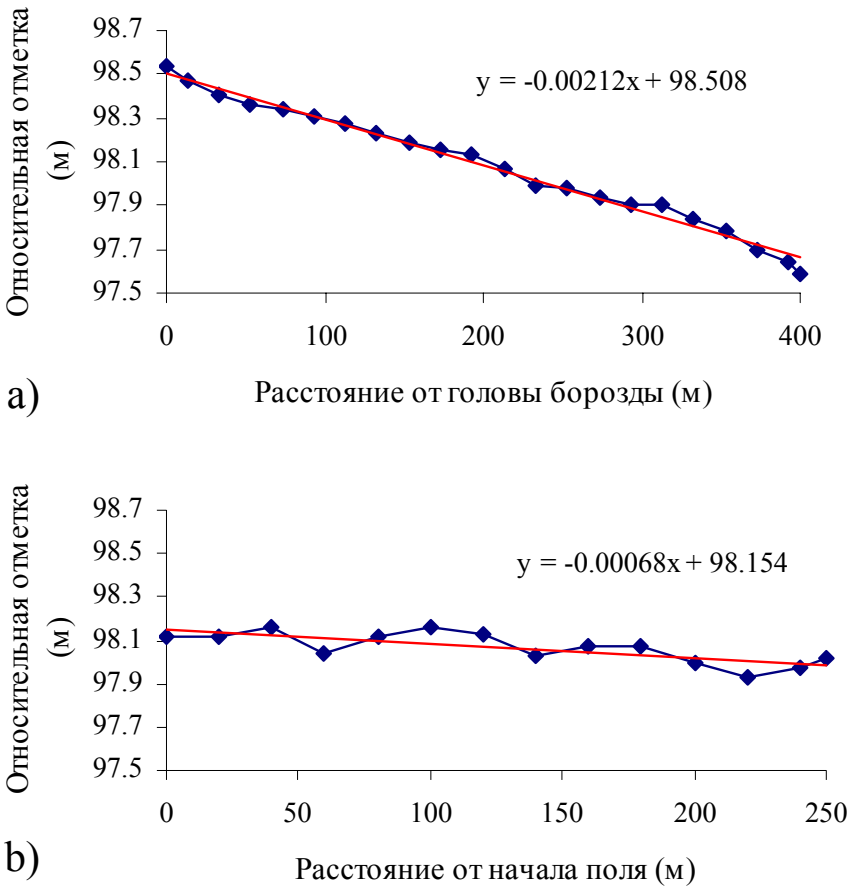


Рис.4. Типичные уклоны поля: (a) продольный и (b) поперечный

Средний поперечный уклон поля составлял S_{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.

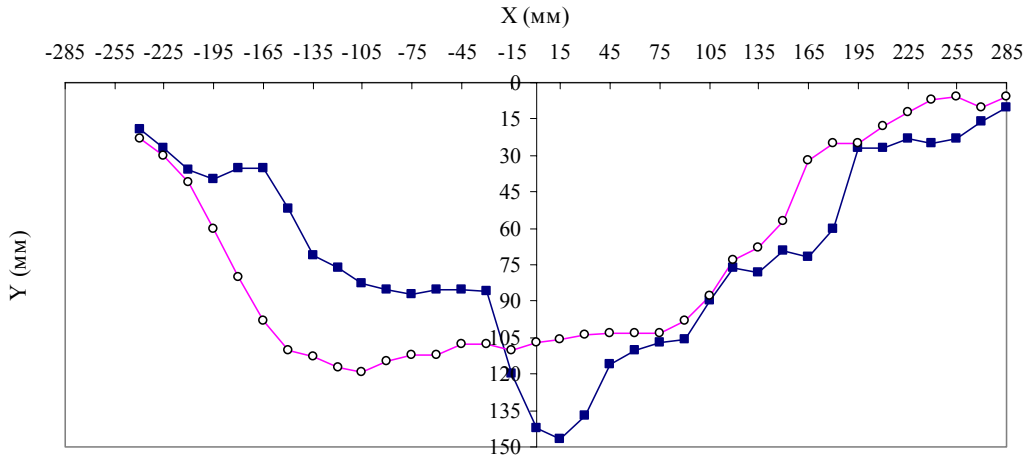


Рис. 5. Типичное поперечное сечение борозды до (■) и после (O) полива (борозда # 9, вариант С, первый вегетационный полив)

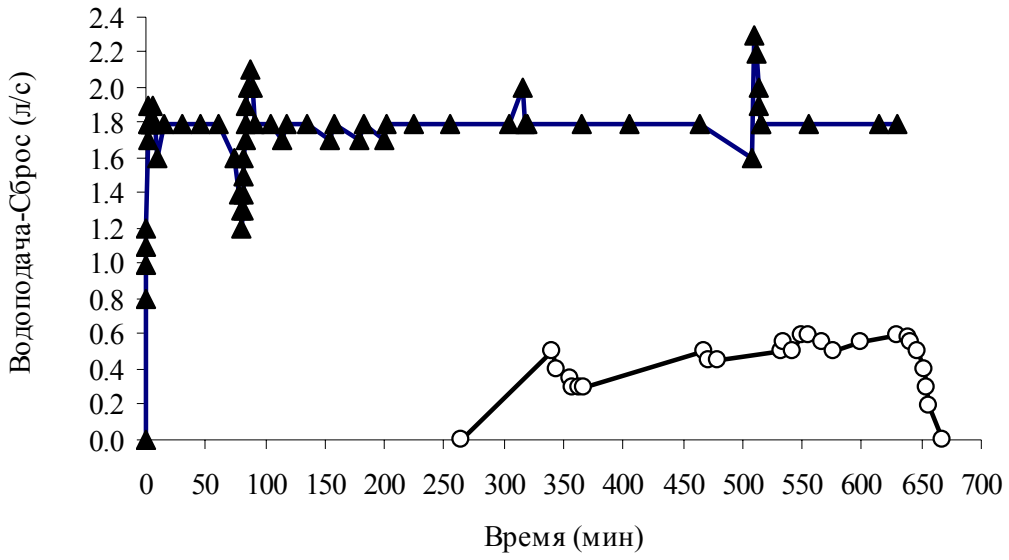


Рис. 6. Типичный гидрограф водоподачи-сброса (борозда 12, вариант D, третий вегетационный полив)

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.

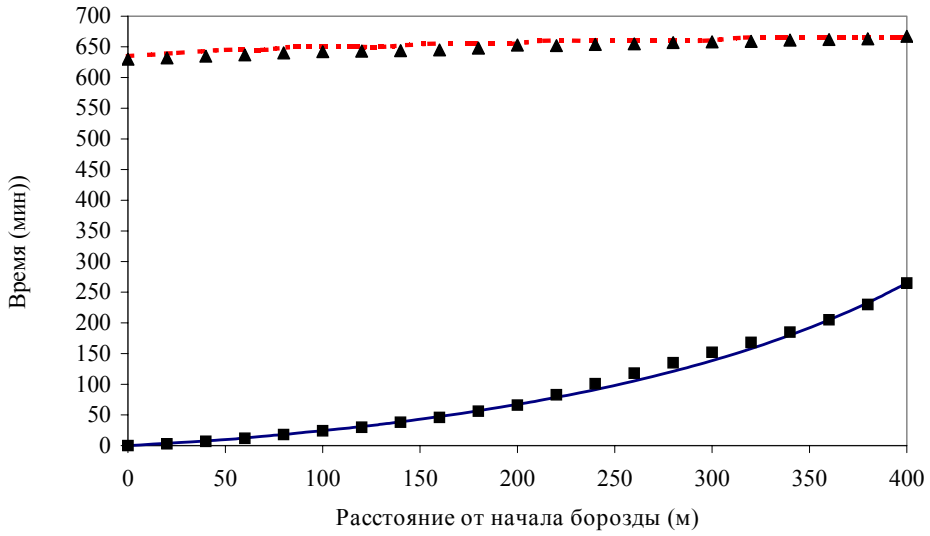


Рис. 7. Наблюденные кривые добега (■) и спада (▲) в сравнении с вычисленными кривыми добега (▬) и спада (---) (борозда 12, вариант D, третий вегетационный полив)

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 $м^{-1/3}$с и менялось от 0,020 до 0,017 $м^{-1/3}$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 ($м^{-1/3}$ 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 $м^3$/мин/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 степенью уплотнения почвы колесами трактора (таблица 1).

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

	Статистические показатели	f_o (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 B, C 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.

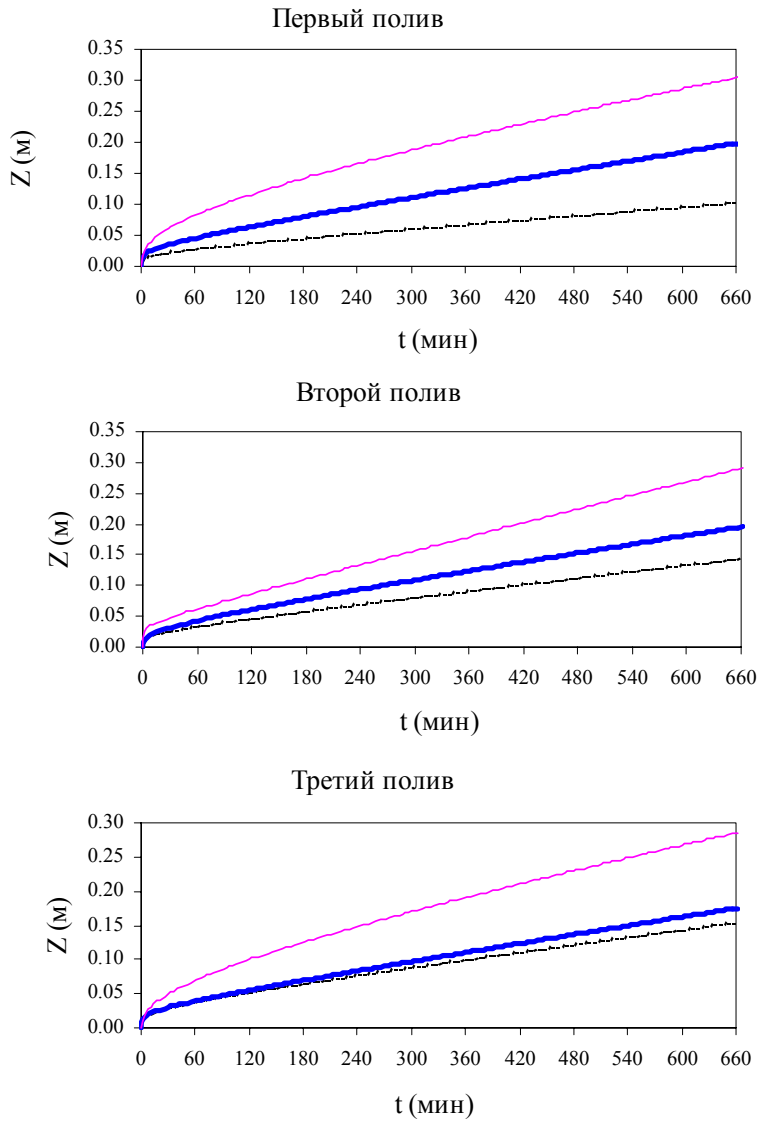


Рис. 8. Семейства кривых суммарной инфильтрации, относящиеся к высокой ( ), средней ( ) и низкой ( ) водопроницаемости для трех поливов (варианты B, C и D)

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

	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
Вариант	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*) 1,67	1,75 1,09	1,17 0,87
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 A) до 74,2 мм (вариант C). 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 добегания. Поливная норма D, в основном, намного выше требуемой Z_{req}. Это связано с большой длительностью добегания 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.

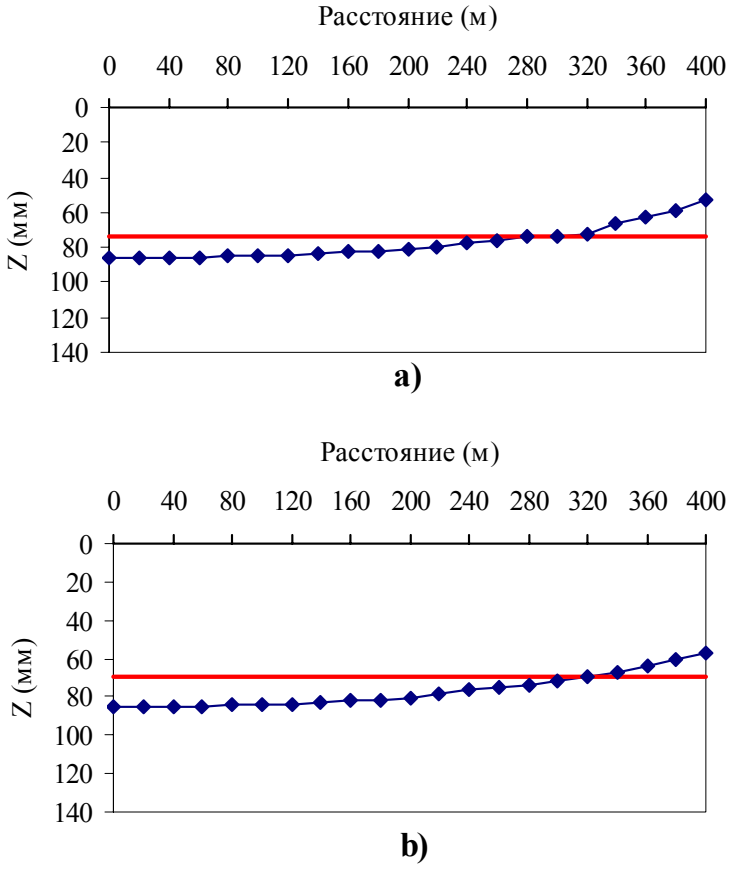


Рис. 9. Профили инфильтрации борозды 10, вариант C:
a) первый полив и b) третий полив

В большинстве случаев концевой 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 Ea и DU были получены для варианта C 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 C 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 B 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 C и 78,9 мм в варианте B (рис. 10). Соответствующие результаты оценки представлены в таблице 7.

Таблица 7. Характеристики третьего вегетационного полива

	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
Вариант	B	C	B	C	D		B	A		
Номер борозды	5	9	6	10	11	12	7	1	2	3
q_{in} (л/с/борозда)	2,39	2,36	1,79	1,78	1,79	1,78	1,21	2,36*) 1,94	1,79 1,02	1,19 0,74
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_{lq} (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

ложа 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 B)

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 переполив 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 C 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 C). 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 B 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:

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

и

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

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 Ea и DU относится к q_{in} = 1,2 л/с в течение добегания 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

	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
Вариант	B	C**)	B	C**)	D	B	A			
Номер борозды	5	9	6	10	11	12	7	1	2	3
q_{in} (л/с/борозда)	2,39	2,36	1,79	1,78	1,79	1,78	1,21	2,36*) 1,94	1,79 1,02	1,19 0,74
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 добегания и доувлажнения
**) Борозды без моделирования улучшений

Для варианта C – 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 C с результатами вариантов B и D (таблица 7) можно отметить, что поливные нормы в случае C 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 концевого 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. Хорст[23], Ш.Ш. Шамуталов[23], Д.М. Гонсалвес[24], Л.С. Перейра[24]

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 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), дом11,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.

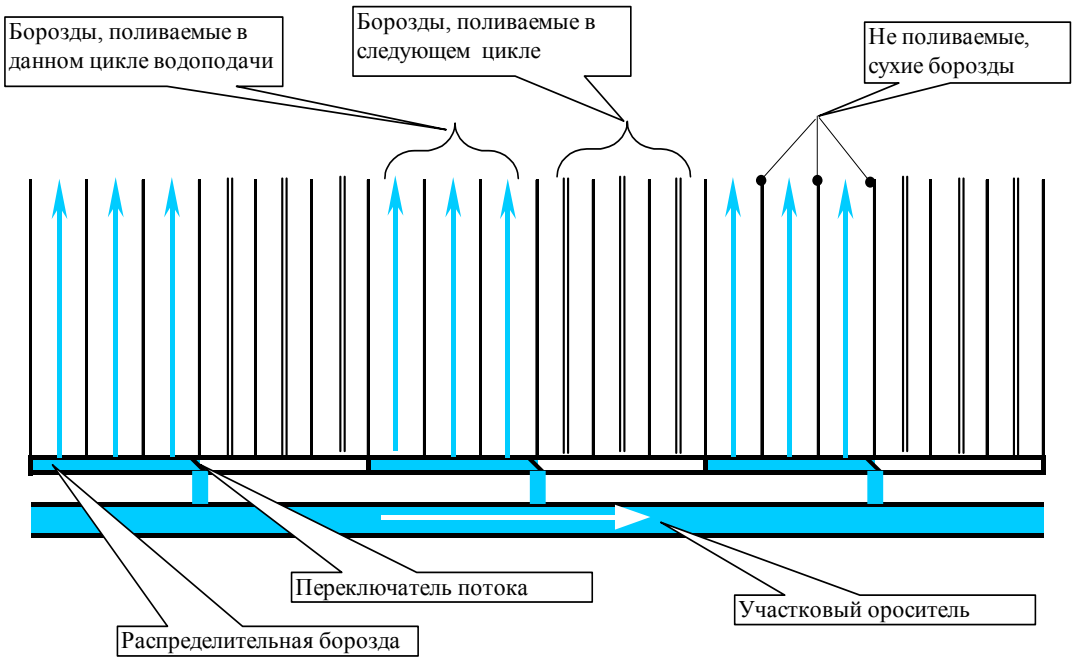


Рис.1. Схема дискретной водоподачи при поливе через борозду

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 добегания 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).

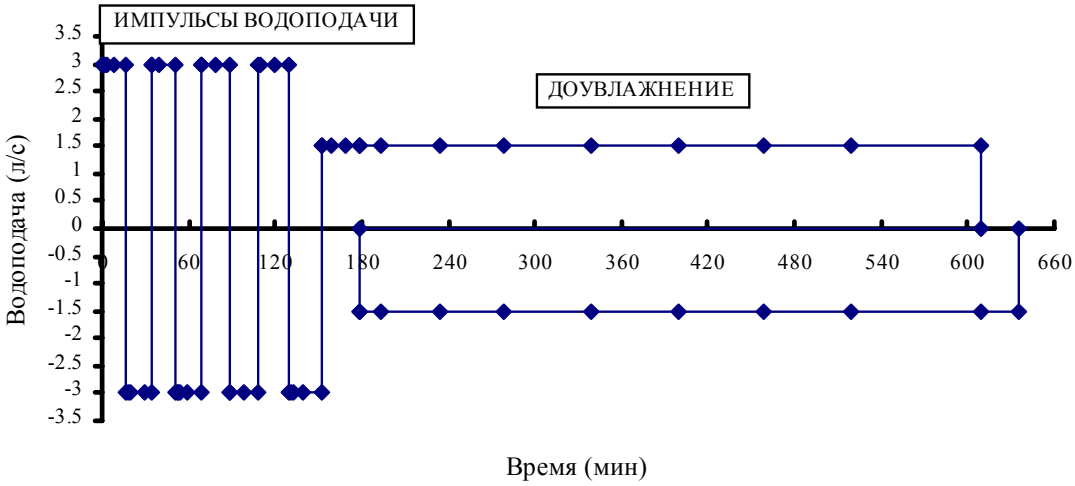


Рис.2. Режим дискретного полива для варианта Fb (положительные значения относятся к поливу правого плеча, а отрицательные – к левому плечу)

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	Объем. вес	Пороз-ность	Полевая влагоемкость FC		Влажность завядания WP		Доступная почвенная влага ASW	
(см)	(см)	(г/см^3)	(%)	(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/см^3) 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):

$$Z = k\tau^{\alpha} + f_o\tau \qquad [1]$$

где Z – суммарная инфильтрация на единицу длины борозды ($м^3$/м), τ - эффективное время впитывания (мин); α и k – эмпирические параметры и f_o – эмпирическая основная скорость инфильтрации ($м^3$/мин/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_o, 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:

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

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

$$FP = \begin{cases} \left(\dfrac{x_{i-1} - x}{x_{i-1} - x_{i-2}}\right)^{\lambda} & (\text{if } x_{i-2} \le x \le x_{i-1}) \\ 0 & (\text{if } x < x_{i-2}) \\ 1 & (\text{if } x > x_{i-1}) \end{cases} \qquad [3]$$

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:

$$Z = [k + (k - k_s)\,FP]\,\tau^{[\alpha + (\alpha - \alpha s)\,FP]} + [f_o + (f_o - f_s)\,FP]\,\tau \qquad [4]$$

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 концевого сброса, и DPR (мм; %), объем глубинной фильтрации (Walker and Skogerboe, 1987; ASAE, 2003).

E_r (%) оценивался так:

$$E_r = \frac{Z_{avg\,(root\ zone)}}{Z_{recq}} \times 100 \qquad [5]$$

а IE (%) выводился из:

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

где Z_{recq} – 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); $Z_{avg(root\ zone)}$ – средний слой воды впитавшейся в корневой зоне на всей орошаемой площади (мм).

DPR рассчитывался из разницы между Z_{avg} и $Z_{avg(root\ zone)}$, 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:

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

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:

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

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:

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

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. 3a), то в борозде, водоподача в которую регулируется дискретно, происходит лишь переформирование профиля и придонная часть ложа борозды заполняется почвой с бортов борозды (рис. 3b). 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.

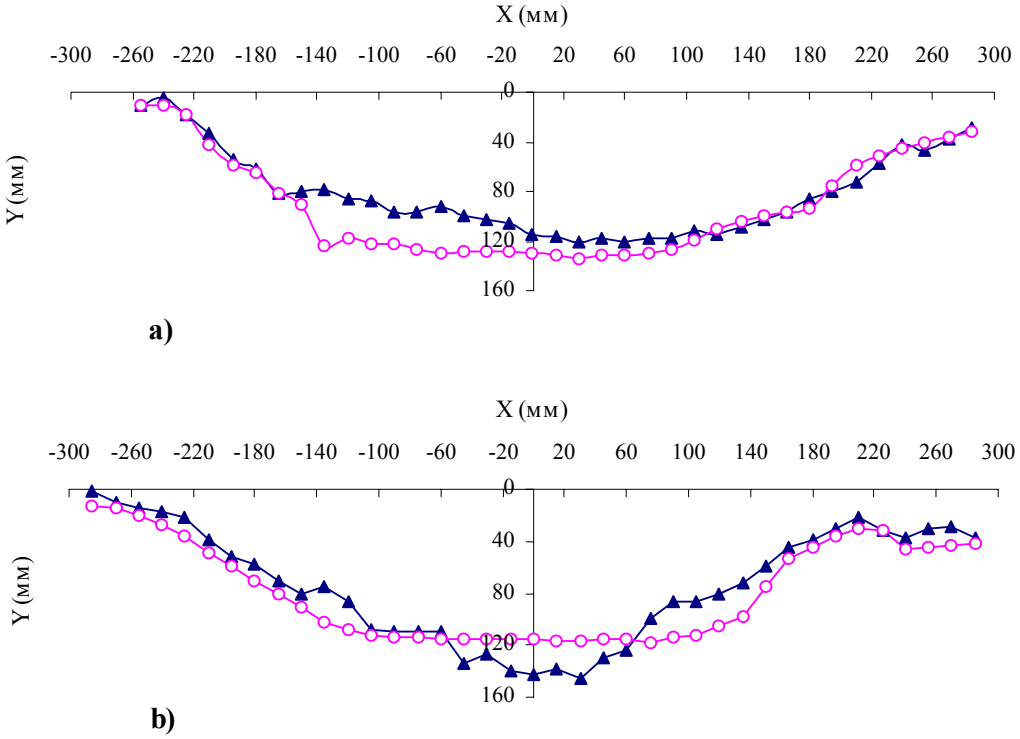


Рис. 3. Типичные поперечные профили борозд до (▲) и после (○) полива
(a – при непрерывной водоподаче; b - при дискретной водоподаче)

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 *et al.*, 1998);
$p_{(befor\ irr)}$	фактическая доля истощения почвенной влаги перед поливом;
t_{co}	длительность полива, мин;
t_{surge}	длительность импульса водоподачи, мин;
$q_{in\text{-}flow}$	фактический расход водоподачи в борозду, л/с;
L_{adv}	длина добега поливной струи, м;
$t_{out\text{-}flow}$	продолжительность поверхностного сброса, мин;
$q_{out\text{-}flow}$	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
	$q_{in\text{-}flow}$	(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
	$q_{in\text{-}flow}$	(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
	$q_{in\text{-}flow}$	(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
	$q_{in\text{-}flow}$	(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
	$q_{in\text{-}flow}$	(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	$t_{out\text{-}flow}$	(мин)	502	491	445	452	472	464	440	437	535	534	518	516
	$q_{out\text{-}flow}$	(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

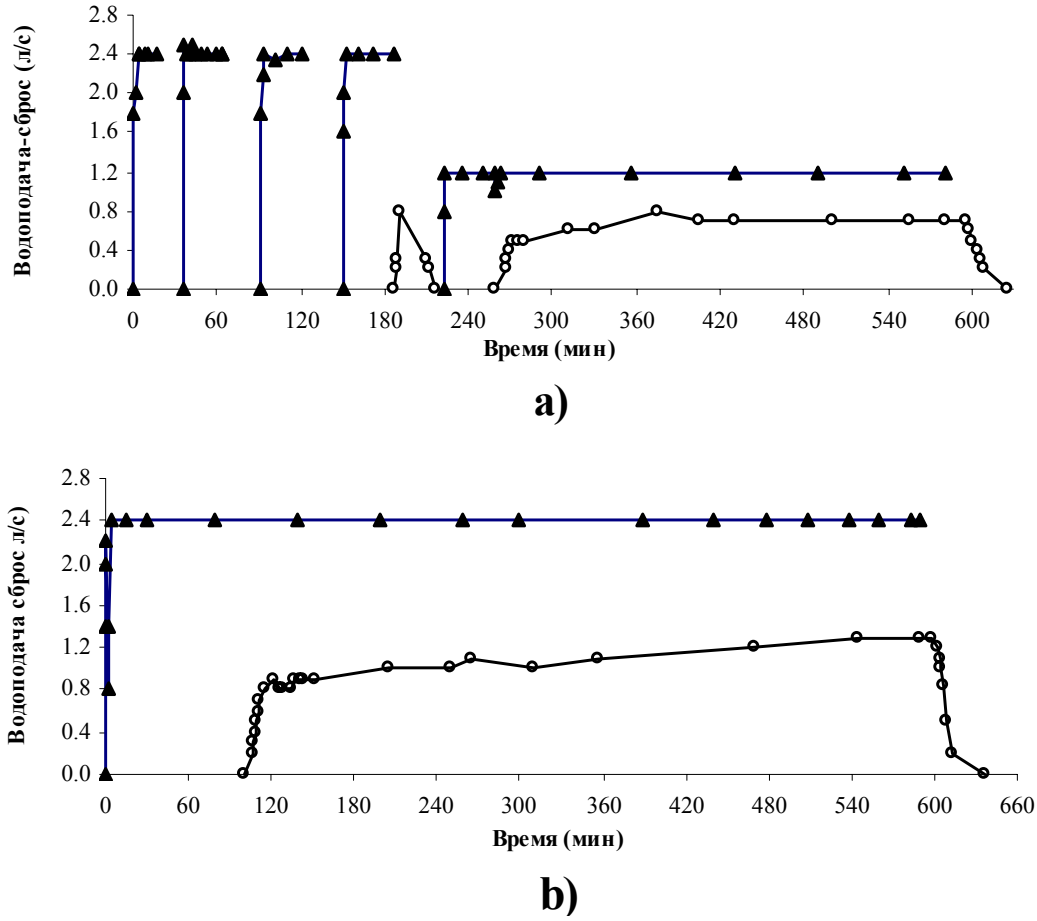


Рис. 4. Типичные гидрографы «водоподача (▲) – сброс (○)»: при дискретной (a) и непрерывной (b) водоподаче

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 добегания 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.

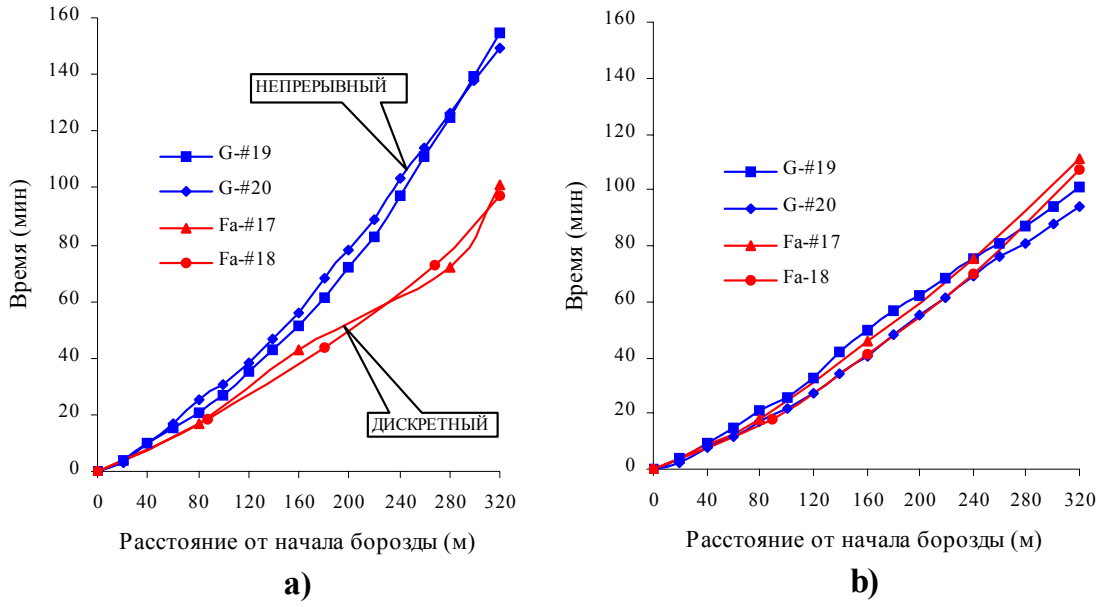
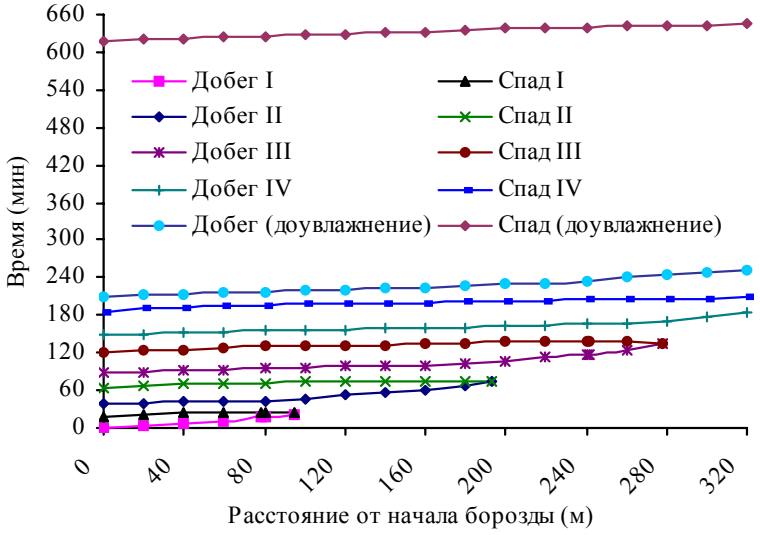


Рис. 5. Сравнение добегов поливных струй при непрерывной и дискретной водоподаче расхода q = 2,4 л/с (a –первом поливе; b – при четвертом поливе)

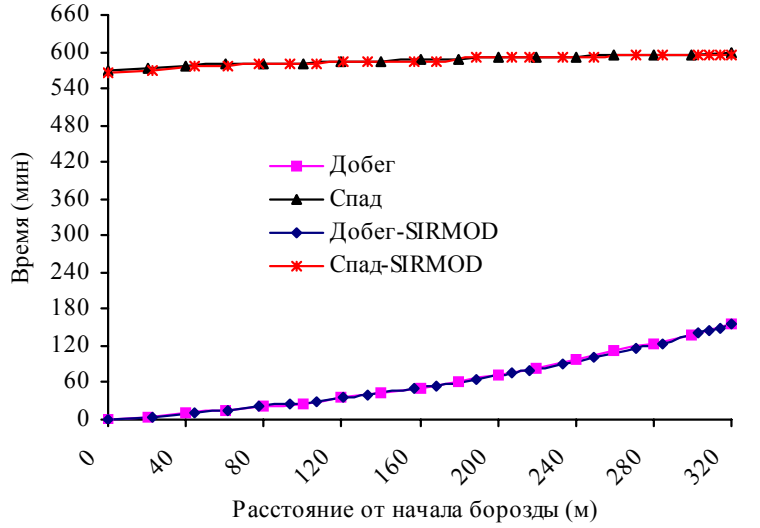
Гидравлическая шероховатость и инфильтрация

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.

Расчетные основная скорость инфильтрации f_o и параметры инфильтрации k и α представлены в таблице 4. Основная скорость инфильтрации f_o для борозд с дискретной водоподачей была почти вдвое меньше аналогичного показателя для варианта с непрерывной водоподачей, изменяясь в диапазоне от 0,000128 м^3/мин/м (для первого полива) до 0,000098 м^3/мин/м (для четвертого полива). Значительная вариация f_o при первом поливе (CV=0,48) вероятно связана с разными степенью уплотненности борозд и комковатостью в этот период. При четвертом поливе вариация была значительно ниже (CV=0,15). Для борозд с непрерывной водоподачей f_o изменялась от 0,000210 до 0,000220 м^3/мин/м, т. е. намного меньше, чем при дискретной водоподаче.



a)



b)

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

Таблица 4. Оцененные значения параметров инфильтрации

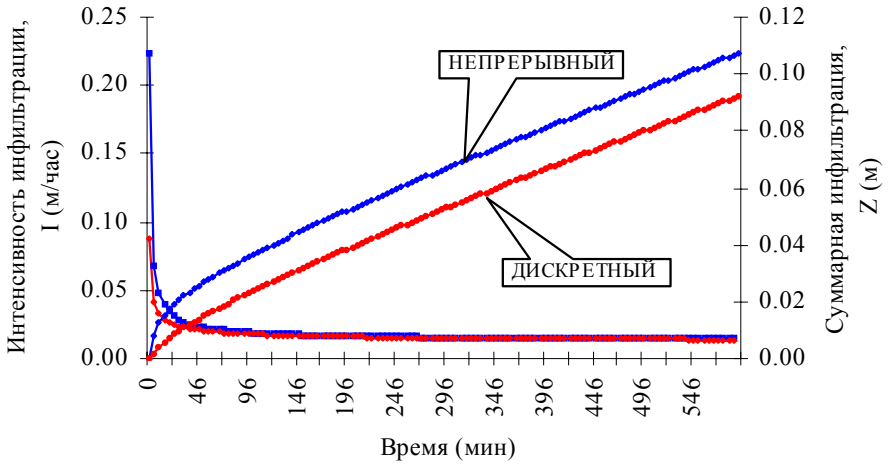
		f_o ($м^3$/мин/м)	k ($м^3$/мин$^\alpha$/м)	α
Все борозды при дискретной водоподаче и все поливы	Среднее	0,000113	0,0028	0,353
	Стандартное отклонение	0,00004	0,0004	0,114
	CV	0,36	0,14	0,32
Все борозды при дискретной водоподаче, первый полив	Среднее	0,000128	0,0030	0,383
	Стандартное отклонение	0,00006	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 $м^3$/мин$^\alpha$/м (для первого полива) до 0,0026 $м^3$/мин$^\alpha$/м (для четвертого полива) с CV = 0,10 и CV = 0,15 соответственно. В варианте с непрерывной водоподачей значения k = 0,0185 $м^3$/мин$^\alpha$/м (для первого полива) и k = 0,0132 $м^3$/мин$^\alpha$/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.

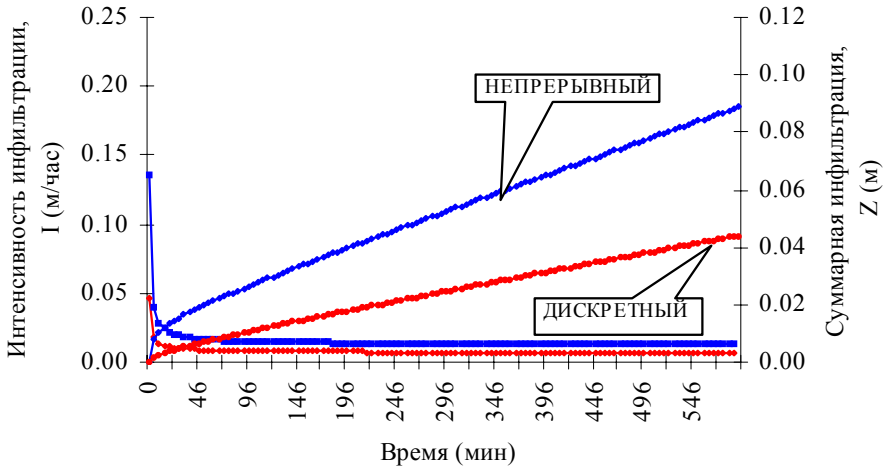
Как ранее упоминалось, различия в параметрах инфильтрации для дискретного полива и полива непрерывной струей продуцируют, как это показано на рис. 7, различающиеся кривые инфильтрации.

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

последующих поливов на процессы переформирования почвенных агрегатов.



a)



b)

Рис. 7. Типичные кривые инфильтрации при непрерывной (борозда 19) и дискретной (борозда 21) водоподаче: a) при первом поливе; b) 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 обусловливает случаи низкой эффективности использования поливной нормы. Результаты для обоих поливов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Эксплуатационные характеристики первого и четвертого поливов хлопчатника

		Первый полив						Четвертый полив					
Дата		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_{recq}	(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 концевого 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 м^3/мин/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_{recq}. Как ранее отмечалось, это явилось следствием неоптимального графика поливов
- Объем концевого 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):

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

и

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

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

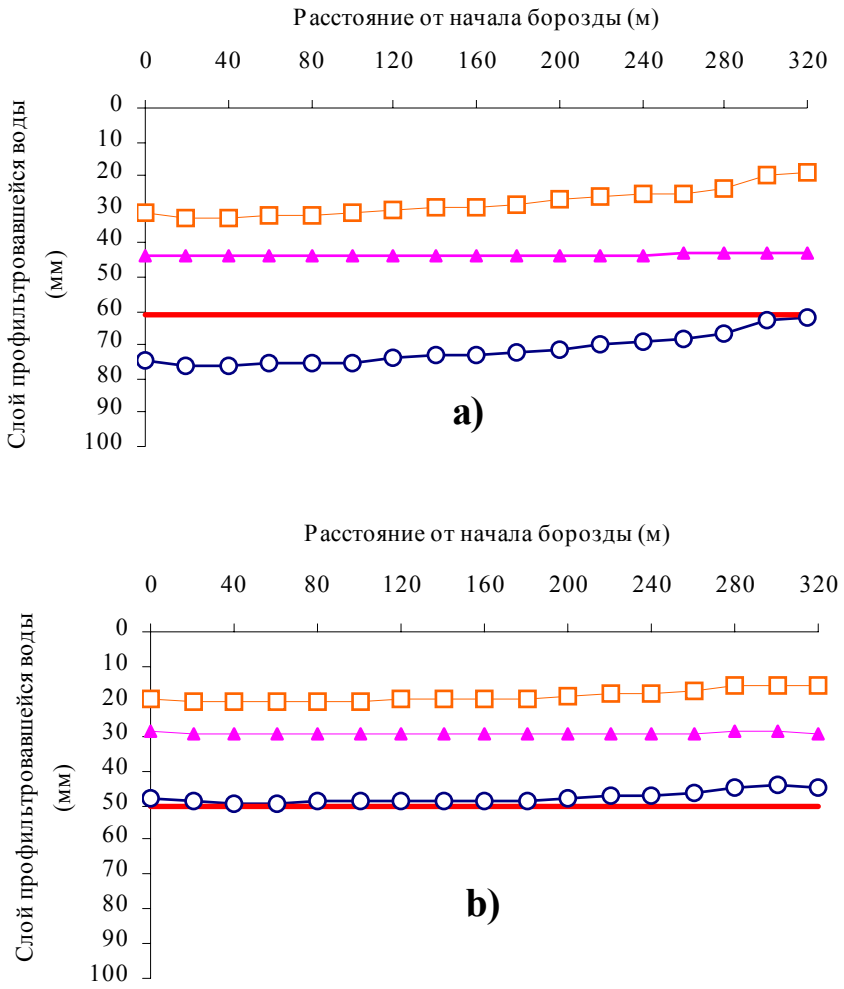


Рис. 8. Профили инфильтрации при дискретной водоподаче (вариант Fb) с различной инфильтрацией в течение дискретной фазы (□) и фазы доувлажнения (▲); (○ – суммарная инфильтрация); (— – поливная норма): a) при первом поливе; b) при четвертом поливе

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

вие, снижение концевого 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 водоподачи, явившиеся чрезмерными

- *Дискретный полив:* (a) сокращение длительности водоподачи t_{co} в случае низкой инфильтрации, аналогично указанному выше; (b) дискретность водоподачи 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

		Первый полив				Четвертый полив			
Дата		13.06.2002				02.08.2002			
# Борозды		19	20	19	20	19	20	19	20
Условие		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_r	(%)	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.

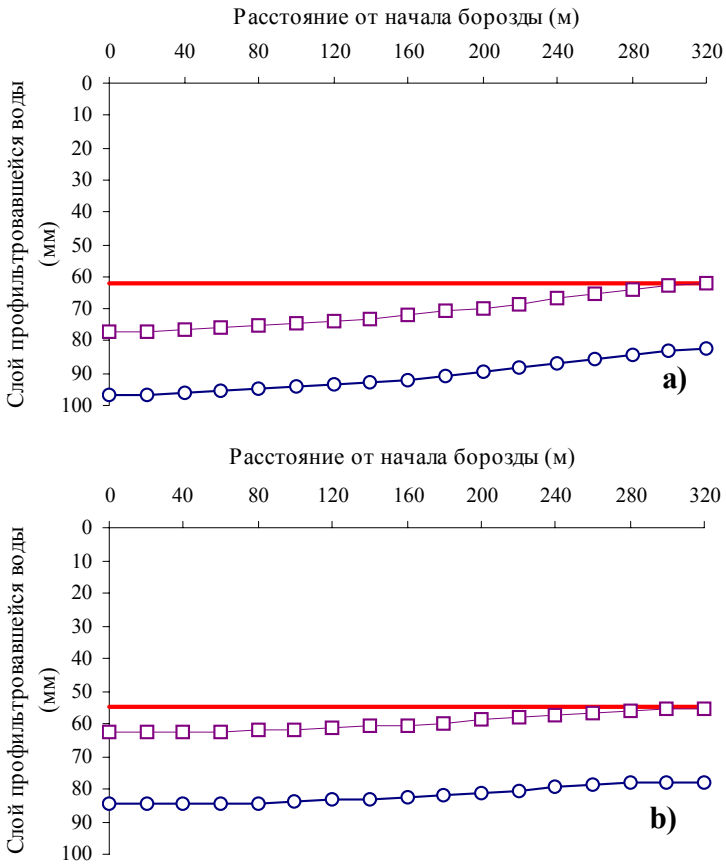


Рис.9. Профили инфильтрации при непрерывной водоподаче (вариант G): сравнение фактических (○) и расчетных (□) расходов (— – поливная норма): при первом (a) и четвертом (b) поливах

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 %.

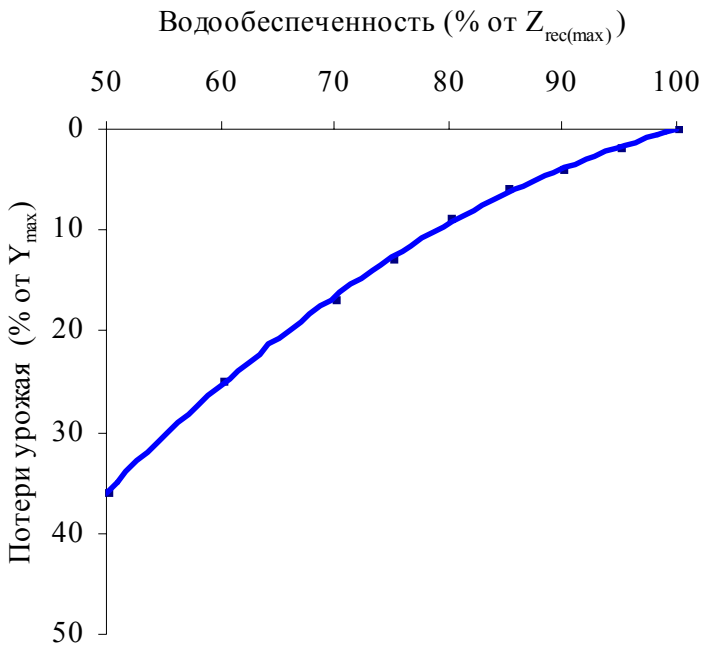


Рис. 10. Зависимость «вода-урожай» для хлопчатника (Шредер и др., 1977)

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 водоподачи с непрерывной водоподачей и полив с чередованием поливаемых и сухих междурядий с поливом в каждую борозду: EC - полив постоянной струей в каждую борозду; ES - дискретный полив в каждую борозду; AC - полив постоянной струей через борозду; AS - дискретный полив через борозду. Каждый из вариантов относился к различной схеме организации бороздкового полива. Каждый из вариантов отрабатывался 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 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 (EC) вариант AS использовал на 3890 м^3/га (44 %) меньше, а урожайность уменьшилась лишь на 380 кг/га (11 %). На вариантах ES и AC использовалось практически одинаковое количество воды и получены близкие показатели урожайности и продуктивности использования воды.

Таблица 7. Затраты воды (D), фактическая урожайность (Ya) и продуктивность использования воды (WP) при четырех способах полива хлопчатника

Схемы полива	D (м^3/га)	Изменения водоподачи относительно среднего (%)	Y_a (кг/га)	Изменения урожайности относительно среднего (%)	WP (кг/м^3)	Изменения продуктивности оросительной воды относительно среднего (%)
EC	8813	31	3391	9	0,38	-20
ES	6925	3	3041	-2	0,44	-8
AC)	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:

$$WCF_{(field)} = \frac{ET_a}{(D+P)} \qquad [12]$$

где ET_a – фактическое водопотребление хлопчатника (мм), которое обеспечивает урожайность хлопчатника Ya; D – суммарный слой водоподачи (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:

$$BWUF_{(field)} = \frac{ET_a(1+\frac{LF}{100})}{(D+P)} \qquad [13]$$

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 водоподачи (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 водоподачи 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 концевого 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 м^3/га (44 %), а урожайность уменьшилась лишь на 380 кг/га (11 %), в то же время продуктивность использования оросительной воды была 0,61 кг/м^3 (при 0,38 кг/м^3 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.

Часть 4

ДРЕНАЖ И КОНТРОЛЬ ЗАСОЛЕНИЯ

Глава 15.

ДРЕНАЖ И КОНТРОЛЬ ЗАСОЛЕНИЯ: ОБЗОР ПРОБЛЕМ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В.А. Духовный[25], Х. Якубов[25], П.Д. Умаров[25]

Реферат: Дренаж в аридной и полуаридной зонах, подверженных неблагоприятным эколого-мелиоративным процессам, предназначен для регулирования и управления водно-солевыми балансами орошаемой территории и водно-солевыми режимами почв. Он также применяется для регулирования водного режима подтопленных и переувлажненных земель, формируемых в процессе развития орошаемого земледелия. В статье дается обзор методов и технологий, применяемых в странах Центральной Азии, и приводится анализ наблюдений за работой дренажа, выполненных на экспериментальном участке хозяйства Азизбек в Ферганской области Узбекистана.

Ключевые слова: дренаж, мелиоративные процессы, контроль засоления, водно-солевые режимы, Фергана, бассейн Аральского моря.

Введение

Центральная Азия расположена в пределах бассейна Аральского моря, с его уникальными природно-хозяйственными условиями, характеризующимися бессточностью, естественной глубинной засоленностью почвогрунтов на значительной части территории, аридностью климата и ограниченностью водных ресурсов. Здесь сосредоточен мощный потенциал для

[25] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, г. Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11. dukh@icwc-aral.uz

развития орошаемого земледелия. Указанные факторы вызывают вторичное засоление и переувлажнение (переполив) при орошении, интенсивность их зависит от практики сельхозпроизводства.

Общий земельный фонд бассейна Аральского моря составляет 155 млн. га, из которых около 32,6 млн. га считаются пригодными для развития орошаемого земледелия. Площадь засоленных земель оценивается в 23,922 млн. га или 73,6 % от общей площади, а незасоленных – 8 670.5 тыс.га (26,8 %). При этом сильнозасоленные почвогрунты составляют 7 422,5 тыс. га или 31 % (табл. 1). Из таблицы 1 видно, что незасоленные земли в основном, приходятся на долю Кыргызстана и Таджикистана. Часть этой площади, которая орошается, расположена в пределах зон погружения поверхностных вод, где территория естественно интенсивно дренирована, т.е. в верхних водосборах рек Сырдарьи и Амударьи. Здесь грунтовые воды залегают глубоко и не участвуют в почвообразовательных процессах, поэтому орошаемые земли представлены незасоленными почвогрунтами, за исключением отдельных небольших массивов, расположенных в межгорных и межадырных понижениях.

Таблица 1. Характеристика мелиоративного фонда
региона Средней Азии и Южного Казахстана, тыс. га

Республики	Общая площадь	Площадь сельхозугодий***	Мелиоративный фонд							
			Всего	Незасоленные	%	Засоленные	%	В т.ч. сильно засоленные	% от засоленных	Орошаемые всего
Кыргызстан	15994	10057	3021	2267,5	75	753,5	25	63	8,0	1034,2
Таджикистан	9470	4158	1964	1595,5	81,2	368,5	18,8	73,9	19,0	689,7
Туркменистан	32968	30325	12198	1423,2	11,7	10774,8	88,3	4253,5	39,5	1317
Казахстан	63679	27300	4707	700	15	4000	85	1500	37,5	768
Узбекистан	32889	26085	10710	2684,3	25	8025,7	75	1532	19,0	4164,2
ИТОГО	155000	97925	32,600	8670,5	26,8	23922,5	73,6	7422,5	31,0	7973,1

Наиболее неблагоприятными земельными фондами обладают Туркменистан и южные области Казахстана, где соответственно 88 и 85 % земель, пригодных к орошению характеризуются засоленными почвогрунтами, они расположены в пределах зоны рассеивания «В» и выклинивания «Б» грунтовых вод в дельтовых зонах рек Амударьи и Сырдарьи. Эти территории характеризуются попеременно слабодренированными и не дренированными условиями с близким залеганием минерализованных грунтовых вод к поверхности земли (рис. 1). Несколько меньшими засоленными земельными ресурсами, чем Казахстан и Туркменистан обладает Республика Узбекистан, хотя по общей площади засоления она занимает второе место после

Туркменистана. В Узбекистане из общей площади, пригодной к орошению – 10 710 тыс. га, засолению подвержены 8 025,7 тыс. га или 75 % земель. Притом, если в Туркменистане и Казахстане площади сильно засоленных земель составляют 39,5 % и 37,5 % соответственно, то в Узбекистане она равна 19,0 %, что обусловлено, главным образом, геоморфолого-гидрогеологическими условиями (рис. 1).

Рис .1. Схема геоморфолого-гидрогеологических зон территории Центральной Азии

Условные обозначения: А - зона погружения поверхностных вод; Б - зона выклинивания грунтовых вод; В – зона рассеивания грунтовых вод; Г - пойма реки; Д – река.

Засоление: обзор основных проблем

Характеристика природного засоления почв в Центральной Азии и закономерности формирования соленакопления в них представляет интерес с точки зрения потенциальной опасности вторичного засоления при орошении, планирования освоения новых земель или определения мелиоративных мероприятий (таких как, назначение режима орошения и техники полива, определение типов и размеров дренажа, промывка засоленных земель и др.), а также установления продолжительности мелиоративного (рассолительного) периода.

В этом направлении исследованиями САНИИРИ за 1965-1980 гг. установлено, что геоморфологические особенности орошаемой территории Центральной Азии (предгорья, речные межгорные долины, аллювиальные равнины, низкие дельты и высокие речные террасы) в сочетании с условиями формирования режима грунтовых вод, термическими режимами почвогрунтов и балансами поверхностных и подземных вод определяют принципиальные различия исходного солевого запаса и профиля, как почвенного слоя, так и подстилающих грунтов. В покровном мелкоземе установлено шесть характерных типов солевых профилей на глубину 20-30 м от поверх-

ности, которые определяют интенсивность дренажного солевого стока при развитии орошения и мелиорации земель (рис. 2).

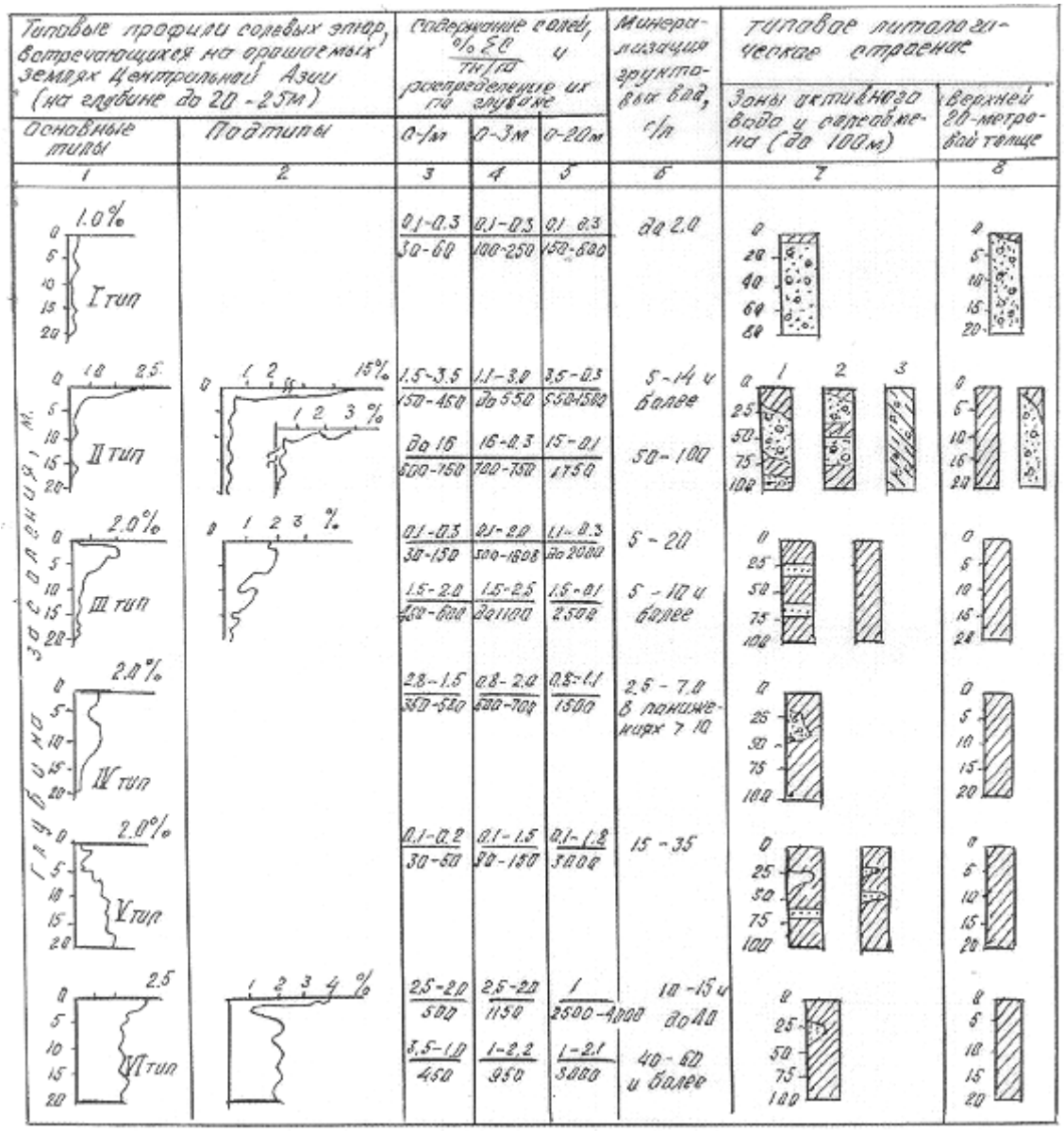


Рис. 2. Типы солевых профилей на орошаемых землях Центральной Азии (В.А. Духовный и др., 2004 г.)

При этом первый тип профиля засоления характерен для естественных интенсивно дренированных земель предгорной равнины, в верхней зоне конусов выноса и для высоких речных террас, а второй тип (II) относится к староорошаемым массивам при близком залегании минерализованных грунтовых вод и районам напорных подземных вод, таких как Ферганская долина Республики Узбекистан, Вахшская долина Республики Таджикистан

и Чуйская долина Республики Кыргызстан. III, IV и V типы профилей засоления присущи регионам аллювиальных, пролювиально-аллювиальных равнин и межгорных котловин до развития орошаемого земледелия, а VI тип профиля – межконусным понижениям и зонам выклинивания грунтовых вод. Указанные закономерности формирования солевых профилей предопределяют интенсивность развития вторичного засоления и требуемый объем рассолительных мероприятий. III, IV, V, VI типы солевых профилей, характеризуемые огромными запасами солей, и соответственные являются основными источниками дренажного солевого стока в бассейне Аральского моря.

Одновременно, в зависимости от содержания и, главным образом, от химического состава засоления, был установлен порог токсичности для развития сельхозкультур, согласно данным классификации засоления почв (табл. 2).

До начала широкого развития искусственного дренажа (1955-1960 гг.) основные площади орошения Центральной Азии были представлены хлоридно-сульфатным и сульфатным типами засоления. Реже встречались хлоридные и сульфатно-хлоридные типы. Щелочные типы засоления встречаются довольно редко и охватывают небольшие площади на территории Туркменистана и Кыргызстана.

По данным САНИИРИ и других научно-исследовательских институтов, из указанной общей площади орошения более 5,97 млн. га нуждаются в искусственном дренировании. Фактическая общая площадь, обеспеченная коллекторно-дренажной сетью составляет 5,35 млн. га (табл. 3).

Дренаж в Центральной Азии

В Центральной Азии наибольшее применение нашли горизонтальный (открытый и закрытый) и вертикальный дренажи.

Площадь, охваченная горизонтальным дренажем, составляет 4 750 860 га. Регулирующая часть этого типа дренажа в основном представлена закрытым трубчатым дренажем и открытыми коллекторами.

Закрытый горизонтальный дренаж, представляет собой перфорированный трубопровод (керамические, пластмассовые, асбестоцементные или другие трубы, диаметр которых 0,07-0,3 м), уложенный под грунт на глубину 2-4,0 м и окруженный защитно-фильтрующим слоем, преимущественно из естественных песчаных и песчано-гравийных материалов толщиной 0,15-0,18 м. В последнее время применялись искусственные защитно-фильтрующие материалы (синтетические волокна, нетканные, иглопробивные полотна), а также их комбинация с естественными фильтровыми смесями (Духовный и др., 1979 г.).

Таблица 2. Классификация почв по степени и химизму засоления
(над чертой – сумма солей, под чертой – токсичные соли) (Е.И. Панкова и др.,1996 г.)

	Химизм засоления (соотношение ионов, мг-экв/100 г почвы)		
	Нейтральное засоление (pH<8.5)		
Степень засоления почв	хлоридный, сульфатно-хлоридный $Cl:SO_4>1$	хлоридно-сульфатный $Cl:SO_4=1-0.2$	сульфатный $Cl:SO_4<0.2$
Порог токсичности (незасоленные почвы)	<0.1 / <0.05	<0.2 / <0.1	<0.3(1.0)*** / <0.15
Слабая	-0.2 / 0.05-0.12	-0.4(0.6)*** / 0.1-0.25	0.3(1.0)-0.6(1.2)*** / 0.15-0.3
Средняя	0.2-0.4 / 0.12-0.35	0.4(0.6)-0.6(0.9)*** / 0.25-0.5	0.6(1.2)-0.8(1.5)*** / 0.3-0.6
Сильная	0,4-0,8 / 0,35-0,7	0.6(0.9)-1.0(1.4)*** / 0.5-1.0**	0.8(1.5)-1.5(2.0)*** / 0.6-1.5
Очень сильная	>0.8 / >0.7	>1.0(1.4)*** / >1.0	>1.5(2.0)*** / >1.5
	Щелочное засоление (pH>8.5)		
Степень засоления почв	хлоридно-содовый**** содово- хлоридный $Cl:SO_4>1$ $HCO_3>Ca+Mg$ $HCO_3>Cl$	сульфатно-содовый и содово-сульфатный $Cl:SO_4<1$ $HCO_3>Ca+Mg$ $HCO_3>Cl$	сульфатно-хлоридно - карбонатный $HCO_3>Cl$ HCO_3 SO_4 $HCO_3<Ca+Mg$
Порог токсичности (незасоленные почвы)	<0.1 / <0.1	<0.15 / <0.15	<0.2 / <0.15
Слабая	0.1-0.2 / 0.1-0.15	0.15-0.25 / 0.15-0.25	0.2-0.4 / 0.15-0.3
Средняя	0.2-0.3 / 0.15-0.3	0.25-0.4 / 0.25-0.4	0.4-0.5 / 0.3-0.5
Сильная	0.3-0.5 / 0.3-0.5	0.4-0.6 / 0.4-0.6	не встречается
Очень сильная	>0.5 / >0.5	>0.6 / >0.6	не встречается

* Сумма токсичных солей равна сумме ионов, выраженных в %.
$S_{ток.\ солей}$ %=(Cl+Na+Mg+$SO_{4ток}$+$HCO_{3ток}$)%. Ионы Cl, Na, Mg относятся к категории токсичных целиком; $HCO_{3ток}$общ-(Ca-HCO_3). Расчет суммы токсичных ионов проводится в мг-экв, затем эти ионы переводятся в проценты и суммируются.
** Показатели по сумме токсичных солей при хлоридно-сульфатном типах засоления для категории сильно- и очень сильно засоленных почв округлены для удобства использования до 1,0-1,5 % против 0,9-1,4 в таблице, приведенной в «Классификации и диагностике почв» (1997).
*** Цифры в скобках соответствуют степени засоления по сумме в гипсоносных почвах, к которым отнесены почвы, содержащие более 1 % $CaSO_4$ * H_2O; по данным водных вытяжек обычно эти почвы содержат более 10-12 мг/экв. CA и SO_4 (не токсичного).
**** Степень содового засоления оценивается по показателям хлоридно-содового.

Таблица 3. Характеристика коллекторно-дренажной сети бассейна Аральского моря, на 2000г. (Духовный и др., 2004)

Страна	Орошаемая площадь (10^3 га)					Скважины вертикального дренажа		Площадь, обслуживаемая одной скважиной (га)
	всего	в том числе:				кол-во	в т.ч. работающие (%)	
		1	2	3	4			
Узбекистан	4250.6	3 360.0	2 893.4	2 523.9	450	4 179	25-30	107.7
Казахстан	786.2	5 30.0	420.2	2 57.9	320	1503	00	213
Кыргызстан	411.8	158.04	158.04*	157.14	0,9	64	37.0	14.0
Туркменистан	1860.6	1511.2	1511.2*	1488.69	22.5	254	87.0	88.6
Таджикистан	718.0	364.5	364.5	323.23	41.24	1962	20	21.0
Итого по бассейну Аральского моря	7896	5973.6	5347.3	4750.86	764.6	7762	36.7	107.5

Страна	Протяженность сети (км)				
	Межхозяйственная		Внутрихозяйственная		
	всего	удельная протяженность (м/га)	всего	в т.ч. закрытый	удельная протяженность (м/га)
Узбекистан	31353.6	8.1-19.0	106439.7	38300.2	10-67.0
Казахстан	2400.0	3.1	13700.0	опытные участки	28.0 Кызыл-Орда
Кыргызстан	42.0	0.27	869.2	137.5	5.5
Туркменистан	8988.9	5.24	25263.4	6345.8	14.7
Таджикистан	2213.0	6.4	9279.0	3817	32.0
Итого по бассейну Аральского моря	44997.5		155551.3	48600.5	

*Орошаемая площадь, на которой имеется коллекторно-дренажная сеть;
1. Площадь, требующая дренирования; 2. Площадь, обеспеченная дренажем;
3. Площадь, охваченная горизонтальным дренажем; 4. Площадь, охваченная вертикальным дренажем

Поступление воды в дрену происходит самотеком под действием напора, образованного за счет разницы в уровнях грунтовых вод на междренье и в полости перфорированного трубопровода. Для осуществления ремонтно-эксплуатационных работ на закрытой горизонтальной дрене предусматриваются специальные сооружения (смотровые колодцы, устья). Междренное расстояние определяется гидрогеологическими и хозяйственными условиями, а также конструктивными особенностями водоприемной части дрен и составляет не менее 50 м.

Вертикальный дренаж построен на площади 764 600 га и представляет собой систему (рис. 3) из буровых скважин с водоприемной и водоотводящей частями, водоподъемного оборудования; зданий для станции управле-

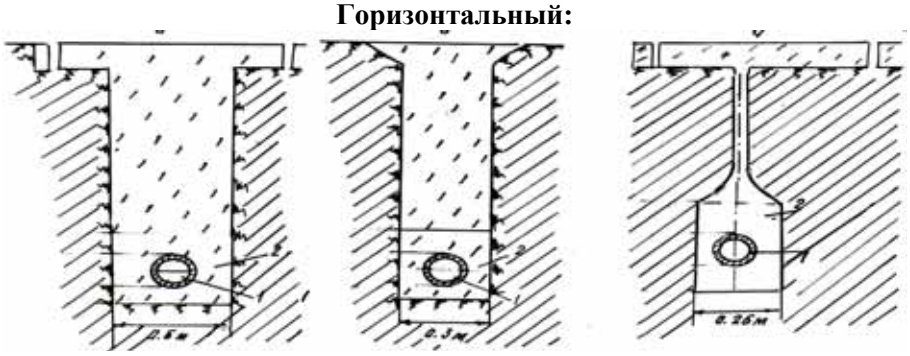
ния контрольно-измерительной аппаратурой, средствами автоматики и телемеханики; линий электропередач, трансформаторной подстанции и подъездных дорог. Скважины вертикального дренажа, выполняемые обычно диаметром 0,9-1,2 м, предназначаются для воздействия на верхний ярус подземных вод и поэтому бурятся глубиной до 50-100 м.

Водоприемная часть скважин размещается в хорошо проницаемых песчано-гравийных отложениях и оборудуется фильтровым каркасом, защищенным песчано-гравийной фильтровой обсыпкой. Водоподъемное оборудование размещается в эксплуатационной колонне труб, размещаемой над фильтровым каркасом. В качестве эксплуатационной колонны обычно использовались стальные обсадные, тонкостенные сварные, полимерные и асбестоцементные трубы, диаметром до 0,4 м, а для фильтрового каркаса применялись перфорированные трубы из тех же материалов или фильтры заводского изготовления. Площадь обслуживания скважины зависит от гидрогеологических и хозяйственных условий и может достигать 100-150 га.

Комбинированный дренаж (рис. 3) представляет собой систему из горизонтальных дрен (коллекторов), размещаемых в слабопроницаемом покровном мелкоземе, и вертикальных самоизливающихся скважин, водоприемная часть которых установлена в хорошо проницаемый подстилающий слой. На фоне такой системы возникающий при поливах напор, сопровождаемый подъемом грунтовых вод, передается в нижний хорошо проницаемый слой и формирует приток к вертикальным скважинам и самоизлив в сеть горизонтального дренажа. Соответственно, самоизливающиеся скважины, размещаемые вдоль дрены, усиливая ее действие, соответственно позволяют значительно расширить междренные расстояния. Для повышения водозахватной способности скважины комбинированного дренажа (глубиной не более 30 м) бурятся диаметром 500 мм и обсаживаются пластмассовыми трубами диаметром 100 мм с перфорацией в нижней части, размещаемой в хорошо проницаемом подстилающем слое (Духовный и др., 1982). Разработанный и доведенный авторами этого раздела до производственного внедрения (1975-1985 гг.) данный тип дренажа был реализован на площади 35-40 тыс. га.

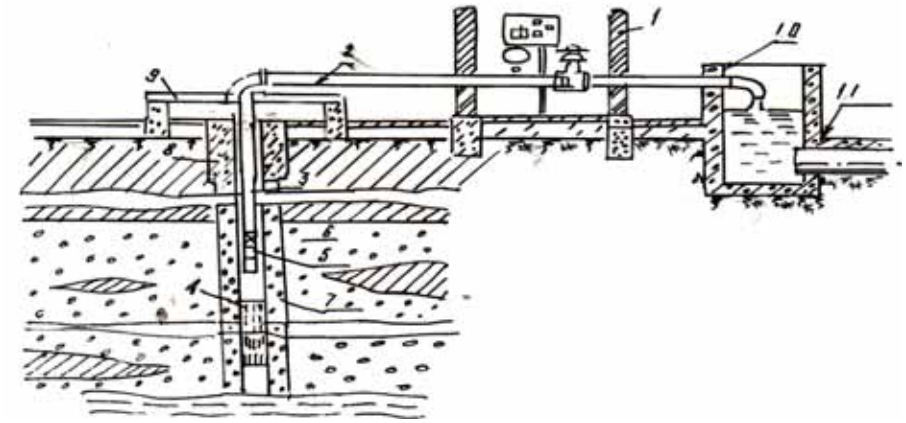
В качестве фильтровой защиты используется песчано-гравийная смесь специального состава, засыпаемая в затрубное пространство между водоподъемной колонной и стенками скважины. Расстояние между скважинами, устраиваемыми вдоль дрен, зависит от гидрогеологических условий и составляет 100-200 м.

Горизонтальный:



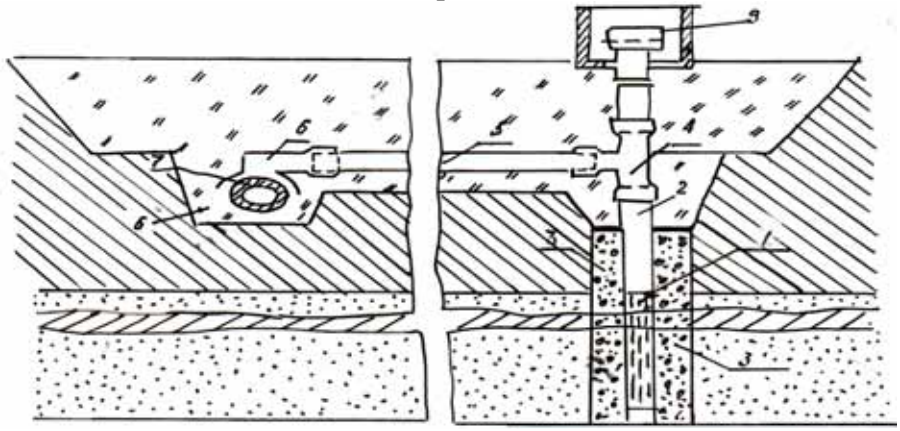
a: траншейный; b: узкотраншейный; c: бестраншейный. 1: перфорированная труба
2: песчано-гравийная обсыпка 3: грунт обратной засыпки

Вертикальный:



1: здание управления; 2: напорный трубопровод; 3: эксплуатационная колонна;
4: фильтровая колонна; 5: насос; 6: электродвигатель; 7: гравийная обсыпка;
8: кондуктор; 9: опорная рама; 10: водоприемный колодец; 11: водосброс

Комбинированный:



1: фильтровая колонна; 2: водоподъемная колонна; 3: фильтровая обсыпка скважины;
4: тройник; 5: водоотводящая труба; 6: бандаж с отводом; 7: труба дрена;
8: фильтровая обсыпка дрены; 9: оголовок скважины

Рис. 3. Типы совершенного дренажа в Центральной Азии
(В.А. Духовный и др., 1979, 1982; Н.М. Решеткина и др., 1978)

Выбор того или иного из выше перечисленных типов дренажа производится на основе анализа гидрогеологических особенностей конкретной территории. Горизонтальный дренаж в основном подходит для условий однородного строения грунтов с коэффициентом фильтрации от 0,01 до 1 м/сут и более, при близком (до 5 м) залегании водоупора. Он эффективен также в условиях неоднородного строения грунтов с маломощными (3-4 м) покровными мелкоземами, когда появляется возможность вскрывать хорошо проницаемые подстилающие слои (песок, гравий, и т.д.) и укладывать в них горизонтальные дрены.

Вертикальный дренаж перспективен в условиях преимущественно неоднородного строения грунтов с мощными (15-45 м) покровными мелкоземами, подстилаемыми хорошо проницаемыми песчано-гравийными слоями мощностью более 5 м и водопроводимостью более 100 $м^2$/сут. Он может быть эффективен и при меньшей водопроводимости в условиях слабой проницаемости (менее 0,1 м/сут) покровных мелкоземов или напорности подземных вод подстилающих слоев. Ограничения по мощности покровного мелкозема обусловлены тем, что при мощностях менее 15 м на фоне вертикального дренажа создается пространственная неравномерность по глубине залегания грунтовых вод, скорости их снижения и темпам рассоления почво-грунтов, а при мощностях более 45 м резко возрастает сопротивление покровного мелкозема и теряется гидравлическая связь грунтовых вод покровного мелкозема, с подземными водами подстилающих слоев (Решеткина *и др*., 1978).

Комбинированный дренаж перспективен в условиях неоднорогого строения грунтов, сложенных покровными слабопроницаемыми (0,01-0,5 м/сут) мелкоземами мощностью от 5 до 15 м и хорошо проницаемыми напорными или безнапорными подстилающими слоями водопроводимостью более 10 $м^2$/сут. Неприменимость комбинированного дренажа в условиях маломощных покровных мелкоземов объясняется тем, что укладка его горизонтального элемента (глубиной 3-4 м) непосредственно в подстилающие хорошо проницаемые слои исключает необходимость устройства его вертикального элемента (скважин). При мощностях же мелкоземов более 15 м начинает возрастать его сопротивление и снижаться коэффициент перетекания (отношение объема воды с верхнего словя покровного мелкозема к общему расходу отбираемому дренажем). В условиях же слабой проницаемости покровных мелкоземов (менее 0,1 м/сут), когда дренирующей способностью горизонтальной сети можно пренебречь, ее можно заменить неперфорированным «глухим» водоводом, лишь транспортирующим дренажный сток, поступающий из самоизливающихся скважин.

Благодаря таким преимуществам как низкая капиталоемкость, простота и дешевизна эксплуатации, комбинированный дренаж будет особенно перспективен в ближайшее время при реализации программы реконструкции и реабилитации дренажных систем.

Следует отметить, что широкое развитие строительство дренажных систем в Центральной Азии получило в 1960-1990 гг., когда по всем республикам проводилось интенсивное освоение новых и реконструкция мелиоративной сети на староорошаемых землях. В результате этих работ к началу 90-х годов здесь было построено 200,55 тыс. км коллекторно-дренажной сети, из которых 45 тыс. км - межхозяйственные и магистральные коллектора, 155,5 тыс. км - внутрихозяйственные (в том числе, 48,6 тыс. км дрен закрытого типа, а также 7762 скважины вертикального дренажа).

Наибольшая площадь охвата дренажем приходится на долю Узбекистана, где протяженность межхозяйственной и внутрихозяйственной коллекторно-дренажной сети составляет 137 793,3 км, в том числе 31 353,6 км – межхозяйственной. Также в этой республике больше всего внедрены совершенные типы дренажа – закрытые горизонтальные дрены и скважины вертикального дренажа, площади которых составляют соответственно 550 и 450 тыс. га. Однако к 2000 году площадь орошаемых земель под вертикальным дренажем сократилась до 380,4 тыс. га из-за консервации части работающих скважин. Аналогичная картина наблюдается и по системе закрытого дренажа из-за интенсивного отказа работоспособности первичных дрен. Объем неработающих закрытых дрен в Узбекистане и Таджикистане составляет от 34 до 40 % от общей их протяженности.

Вертикальный дренаж также развит в Казахстане и Таджикистане и охватывает соответственно 320 и 41,24 тыс. га с общим числом высокодебитных скважин соответственно 1503 и 1962 штук.

Обслуживаемая площадь одной скважины изменяется в зависимости от гидрогеолого-мелиоративных условий от 107,7 и 213 га (Узбекистан, Казахстан) до 21 га по Республике Таджикистан. В других республиках Центральной Азии больше всего развита открытая коллекторно-дренажная сеть, а вертикальные и закрытые дренажные системы построены в виде опытно-производственных (пилотных) участков.

При мелиорации почв главным показателем обеспеченности дренажем орошаемых земель является его протяженность на один гектар, которая в Узбекистане, Казахстане и Таджикистане составляет соответственно 67 м/га, 28 м/га и 32 м/га на внутрихозяйственном и 8,1-19 м/га, 3,1 м/га и 6,4 м/га на межхозяйственном уровнях. По этому показателю мелиорируемые земли этих республик с учетом наличия систем вертикального дренажа, можно отнести к территориям, обеспеченным искусственной дренированностью. Такими условиями не обеспечен Туркменистан, где удельная протяженность дренажа в среднем составляет 14,7 м/га. Однако следует учесть, что земли этой страны представлены более сложными гидрогеолого-почвенно-мелиоративными условиями.

Магистральные, межхозяйственные коллектора, вертикальный дренаж и частично закрытый дренаж до 1991 года во всех странах Центральной Азии находились на балансе государства (министерств мелиорации и водного хозяйства республик), а внутрихозяйственная открытая коллекторно-

дренажная сеть (КДС) и большая часть закрытых дрен на балансе хозяйств. В соответствии с этим межхозяйственная КДС, вертикальный дренаж и часть закрытого дренажа эксплуатировались областными гидрогеолого-мелиоративными или другими специальными организациями за счет госбюджетных средств. Внутрихозяйственная КДС эксплуатировалась за счет собственных средств хозяйств. Такая система организации эксплуатации сохранилась в Узбекистане и до настоящего времени.

Дренаж и проблемы засоления Ферганской области

Принятая в качестве объекта исследования Ферганская область характеризуется наиболее сложными и неблагоприятными гидрогеолого-почвенными условиями, что обуславливает развитие неблагополучных эколого-мелиоративных процессов при освоении и орошении земель (усиление напорности подземных вод, подъем уровня и рост минерализации грунтовых вод, и особенно, ускоренный темп реставрации засоления почв).

В геоморфологическом отношении территория Ферганской области представлена межгорной замкнутой котловиной, в верхней толще аллювиальными отложениями реки Сырдарьи четвертичного периода, а краевые части аллювиально-пролювиальными отложениями обрамленных гор. Мощность четвертичных отложений в центральной зоне территории достигает 400-500 м, а в краевых частях 25-50 м. В литологическом строении четвертичные отложения представлены переслаивающимися песчано-гравийно-галечниковыми грунтами, разделяющими покровные мелкоземы в виде линз. Верхняя 10-20 м толща представлена переслаивающими мелкоземами: супесью, суглинками и глинами. Рельеф в равнинной части области спокойный, с уклоном от 0,002 до 0,0005 м/м, предгорная часть относится к зоне больших уклонов > 0,002–0,05 м/м и более. С юго-востока на северо-запад территорию пересекает р. Сырдарья, которая является водоприемником коллекторно-дренажных вод (Духовный и др., 2004; Решеткина, 1960).

Геоморфологические условия обусловили своеобразность гидрогеологической обстановки Центральной Ферганы, т. е. формирование высоконапорных подземных вод с притоком их со стороны гор, а также близкое залегание минерализованных грунтовых вод. Здесь до развития дренажных систем грунтовые воды залегали повсеместно на глубине до 2,0 м, и их минерализация изменялась от 3-5 до 10 г/л и более. Пьезометрические напоры повсеместно устанавливаются на 0,2-0,95 м выше уровня грунтовых вод. Воды глубоких слоев (> 20-50 м) – слабоминерализованные, максимум до 3 г/л. При этом подземные воды, залегающиее на глубине 180-200 м и глубже дают самоизлив, а их минерализация не превышает 0,5-1,0 г/л. Величина питания грунтовых вод за счет перетока из подстилающих напорных водоносных горизонтов составляет от 2-3 тыс. $м^3$/га до 8-10 тыс. $м^3$/га, что создает условия близкого залегания грунтовых вод и формирования

громадного дренажного стока, т. е. требует увеличения мощности дренажа (Якубов, 1960).

Почвенные характеристики тесно связаны с геоморфолого-гидрогеологическими факторами. В равнинной предгорной зоне территория представлена маломощными почвами легкого механического состава (супесь, легкие суглинки и др.), подстилаемыми грубо обломочными грунтами. Здесь грунтовые воды не участвуют в почвообразовательных процессах. Равнинная часть территории представлена лугово-сероземными и луговыми почвами, формируемыми с участием питания грунтовых вод. Земли представлены слоистыми почвогрунтами, различного механического состава. Бессточная зона представлена луговыми и лугово-болотистыми почвами, в формировании которых главенствует участие грунтовых вод.

Из-за близкого залегания грунтовых вод и усиленной напорности подземных вод во всех зонах, за исключением интенсивно дренированной, формируется поверхностное засоление и распределение запасов солей в верхнем 1,0-1,5 м слое, ниже которого грунты практически рассолены за счет восходящих токов, идущих из нижележащих водоносных горизонтов. Таким образом, Ферганская область является очень сложным регионом, где протекают неблагоприятные эколого-мелиоративные процессы, для управления которыми необходим комплекс сложных мероприятий, требующих огромных капиталовложений.

Здесь до начала XX века орошалось более 150 тыс. га земель, причем ирригационная система строилась без инженерных проектов и тем более без дренажа. Орошалась, в основном, территория не требующая искусственной дренированности. К середине 20 столетия площадь орошения возросла до 240-250 тыс. гектаров. Орошение развивалось с привлечением новых массивов, больше всего в зонах умеренного и слабого естественного дренирования со строительством межхозяйственных и редких внутрихозяйственных коллекторов без первичных регулирующих дрен, что при близком залегании грунтовых вод привело к развитию вторичного засоления.

К 1970 г. орошаемая площадь составила 286,7 тыс. га, а к 1990 г. она достигла 350 тыс. га, это в основном земли Центральной части Ферганской области между Большим Ферганским каналом и р. Сырдарья, расположенные в пределах естественно дренированной территории. Освоение же в последующем земель адыров усилило грунтовое питание ниже расположенных массивов, тем самым, ухудшив мелиоративное состояние земель. В настоящее время из общей орошаемой площади Ферганской области только порядка 90-100 тыс. га земель не требует искусственного дренирования. Площадь, обеспеченная дренажом, в 1970 г. составила 188 тыс. га (65,7 % от общей площади орошения), а в 2000 году она достигла 261 тыс. га (73,2 %).

На этой площади к 1995 году построены и эксплуатируются 13837 км коллекторно-дренажной сети (в том числе, 1332 км закрытого горизонтального дренажа), 1303 скважин вертикального дренажа. В тоже время к 2000 г. количество работоспособных скважин снизилось до 1288 штук, а

протяженность закрытого горизонтального дренажа (ЗГД) сократилось на 248,1 км (табл. 4). Удельная протяженность, определяющая уровень обеспеченности искусственной дренированностью, даже в 1970-1975 гг. имела относительно высокие значения 44,7 м/га – 52,8 м/га, то есть с 1975 г. она практически не изменялась. Небольшой рост удельной протяженности объясняется за счет строительства закрытого дренажа. При этом параллельно с ростом протяженности горизонтального дренажа здесь интенсивно строились скважины вертикального дренажа, количество которых в 1970 г. составило 100 шт., а к 1995 оно достигло 1003 шт.

Такая мощная система горизонтального и вертикального дренажа обеспечила огромный дренажный водно-солевой сток. Общий дренажный сток в 1970-1975 гг. составил порядка 2554 млн. $м^3$, при водозаборе около 5078 млн. $м^3$. Начиная с 1980 г., дренажный сток более или менее стабилизировался на уровне 2729-3051 млн. $м^3$ в год, при общем водозаборе около 5000 млн. $м^3$ в год. К 2000 г. несколько снизился, как водозабор, так и общий дренажный сток. Доля общего дренажного стока к водозабору по Ферганской области изменяется в пределах от 40,7 % (1970 г.) до 50,4 % (2000 г).

В соответствии с общим объемом водозабора и его минерализацией, которая изменилась от 0,4 до 0,7 г/л, приток солей по области изменился от 2285,5 тыс. тонн (1970 г.) до 3600,2 тыс. тонн (1985 г.) в год, при его удельном значении 17,7 т/га и 15,8 т/га в год. К 2000 г. удельное поступление солей снизилось до 11,4 т/га в год. В тоже время общие и удельные выносы солей из орошаемой территории несколько превышают их поступления: удельные поступления солей с оросительной воды изменяются в пределах от 8 до 10 т/га в год, а удельные выносы солей с дренажными стоками 15-21,1 т/га в год. Водно-солевые балансы поверхностных вод складываются по типу рассоления с выносом солей с орошаемой территории порядка 5,2-11,3 т/га в год. Вынос солей из зоны аэрации изменяется в пределах от 21,0 т/га в год (1970 г.) до 8,6 т/га в год (1990 г.) (табл. 4).

Начиная с 1990 г. баланс зоны аэрации складывается по типу накопления солей выше уровня грунтовых вод, за счет притока их из нижних слоев. В этот период формировался положительный водный баланс между зоной аэрации и грунтовыми водами с притоком, за счет последних, от 528 до 865 $м^3$/га в год и притоком солей от 7,28 т/га до 12 т/га в год. При этом тенденция роста площади засоления и, особенно, по категории выше среднего засоления подтверждает ухудшение эколого-мелиоративных условий и технического уровня дренажных систем. Ухудшение эколого-мелиоративных условий в большей степени обусловлено резким снижением работоспособности внутрихозяйственных дрен-коллекторов, а также систем вертикального дренажа, объем откачек которых снизился за последнее десятилетие в 2,0–2,5 раза.

Таблица 4. Изменение состояние ирригационно-дренажных систем по Ферганской области (Духовный и др., 2004)

Показатели состояния ирригационно-дренажных систем	Год						
	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Орошаемая площадь (10^3 га)	286,70	306,40	318,40	335,94	349,70	357,20	356,81
Площадь, обеспеченная дренажем (10^3 га)	188,0	213,9	235,2	255,2	255,8	258,6	261,0
Общая протяженность дренажа (км)	8398,9	11298	12414,4	12940,2	12479,9	13818,5	13837
в том числе ЗГД (км)	14,3	30,7	48,2	83,1	1185,9	1332,4	1084,3
Удельная протяженность дренажа (м/га)	44,7	52,8	52,8	50,7	48,8	53,4	53,0
Кол-во скважин вертикального дренажа (шт)	100	255	509	768	1044	1303	1288
Объем откачек (млн. $м^3$)	87	219,5	336,57	477,82	638,1	462,1	428,2
Водозабор на орошение (млн. $м^3$)	5078,8	5074,6	5034	5294,4	4983,4	4960,8	4049,9
Минерализация оросительной воды (г/л)	0,45	0,59	0,63	0,68	0,61	0,70	0,70
Приток солей (10^3 т)	2285,5	2994,0	3171,4	3600,2	3039,9	3472,6	2834,9
Удельная водоподача (10^3 $м^3$/га)	17,7	16,6	15,8	15,8	14,3	13,9	11,4
Удельное поступление солей, (т/га)	8,0	9,8	10,0	10,7	8,7	9,7	7,9
Общий дренажный сток (млн. $м^3$)	2554	1598	3023	2191	3051	2871	2729
Дренажный модуль (на дренируемой площади) (л/с/га)	0,43	0,24	0,41	0,27	0,38	0,35	0,33
Чистый дренажный сток (млн. $м^3$)	2043	1277	2418	1753	2441	2297	2183
Чистый дренажный модуль (л/с/га)	0,34	0,19	0,33	0,22	0,30	0,28	0,27
Доля дренажного стока от водозабора (на орошаем. площадь) (%)	40	25	48	33	49	46	54
Удельное водоотведение (10^3 $м^3$/га)	13,6	7,5	12,9	8,5	11,9	11,1	10,4
Минерализация дренажного стока (г/л)	1,8	2,85	2,12	2,39	2,21	2,28	2,28
Общий вынос солей (10^3 т)	4598	4553	6409	5237	6742	6546	6222
Удельный вынос солей (с орошаемой площади) (т/га)	16,0	14,9	20,1	15,6	19,3	18,3	17,4
Доля дренажного стока от водозабора (на дренируемой площади) (%)	50,3	31,5	60,1	41,4	61,2	57,9	67,4
КПД оросительных систем	0,53	0,56	0,58	0,61	0,63	0,59	0,55

Результаты исследований дренажа и контроль засоления в пилотном хозяйстве «Азизбек-1»

Следует отметить, что развитие дренажных систем при их удовлетворительной эксплуатации за 1965-1990 гг. позволило создать на орошаемых землях необходимые условия для формирования благоприятных эколого-мелиоративных условий и повышения продуктивности земли и воды. Эта тенденция детально иллюстрируется результатами исследований на опытно-производственном участке площадью 160 га в Ахунбабаевском районе Ферганской области (рис. 4). По границам участка проходят открытые коллектора: на юго-востоке Отсечный, на юго-западе Средне-Кызылтепинский. Регулирующая сеть состоит из глубоких закрытых дрен Д-1А, Д-1, Д-2, и Д-3, построенных из асбестоцементных труб с песчано-гравелистой обсыпкой.

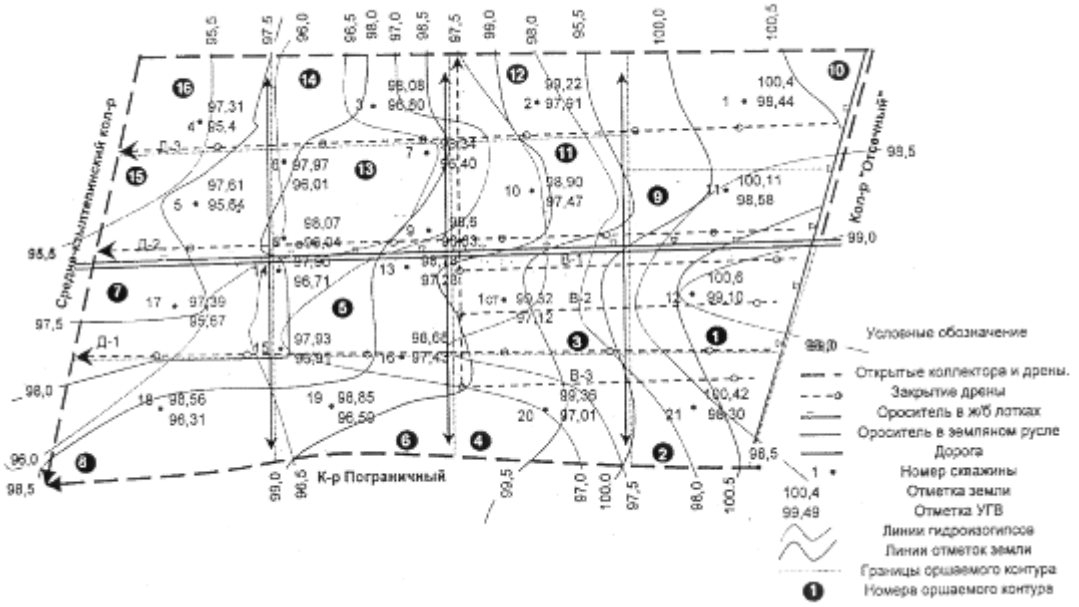


Рис. 4. План-схема и карта гидроизогипс фермерского хозяйства «Азизбек-1» Ахунбабаевского района по состоянию на 07.08.2004 г.

Указанные дрены построены в 1959-1960 гг. и впадают в Средне-Кызылтепинский коллектор, имеющий глубину заложения 3,5-3,7 м. Однако коллектор подвержен заилению и зарастанию и в основном служит для отвода сбросных вод. Пограничный и Отсечный открытые дрены–собиратели на северо-востоке также выполняют роль отводящего тракта сбросных вод, и они практически круглый год переполнены.

В гидрологическом отношении дренажный участок находится в зоне разгрузки подземных вод. По данным САНИИРИ, подземный приток со стороны составляет 3,0-4,0 тыс. $м^3$/га, поэтому пьезометрический напор подземных вод, приуроченных к более глубоким водоносным слоям (глубина 100 м круглый год) устанавливается на 20-70 см выше уровня грунтовых вод.

Кроме указанных дрен на поливных картах 1, 2, 3 и 4 общей площадью около 40 га построены три пластмассовые дрены В-1, В-2 и В-3, глубина которых составляет 2,4 м.

Литологическое строение пилотного участка представлено переслаивающимися отложениями грунтов. Верхняя толща покровных мелкоземов отличается неоднородно-слоистым строением, пылеватостью, наличием на глубине 0,7-1,2 м слабопроницаемых гипсированных прослоек, замедляющих процесс передвижения влаги, а их средний коэффициент фильтрации изменяется от 0,2 до 2,0 м/сут.

До строительства системы закрытого дренажа уровень грунтовых вод залегал на орошаемых землях на глубине 1,2-1,6 м (с общей минерализацией 7-9 г/л), а на не орошаемых – 2,5-2,8 м (с минерализацией 20-22 г/л), что определяло интенсивность соленакопления в зоне аэрации. Содержание солей в метровом слое в исходном состоянии составляло 2,5-3,0 %, местами до 5 % от веса сухой почвы, в том числе, хлора 0,03-0,08 %. Тип засоления почвогрунтов и грунтовых вод – сульфатный.

Система закрытого дренажа введена в эксплуатацию со второй половины 1960 года. Среднегодовая водоподача на орошаемые земли с 1961 по 1975 гг. изменялись в пределах 13-15 тыс. $м^3$/га, а дренажные модули составляли 0,22-0,36 л/сек/га, против 0,17 л/сек/га по проекту. В этот период дренажные линии работали в напорном режиме по всей длине. Нависание грунтовых вод над трубой по длине дрен изменялось от 0,5 до 1,4 м, увеличиваясь к их устьям.

В результате высокой работоспособности построенных дрен и соблюдения требований промывного режима орошения к концу 1964-1965 гг. на пилотном участке было достигнуто определенное улучшение водно-солевого режима:

- почвогрунты опреснились до уровня 1,2-1,4 % от от веса сухой почвы по сумме солей
- минерализация грунтовых вод снизилась до 3,5-5 г/л, против 5,5-10 г/л в исходном состоянии
- урожайность основных культур хлопчатника повысилась до 25-27 ц/га, против исходной 12-18 ц/га.

К концу семидесятых годов водно-солевые режимы практически стабилизировались с определенным диапазоном изменений по периодам года в зависимости от водопоступления на территорию.

Начало исследований по проекту совпало с периодом практически «полной» стабилизации водно-солевых процессов на фоне закрытого дренажа, которые характеризуются установившимися режимами водоподачи, дренажного стока, грунтовых вод и их минерализации, выносом солей с определенным варьированием темпов рассоления внутри года.

Общая площадь пилотного хозяйства составляет 160 га, она состоит из 16 картовых полей орошения, площадь каждой карты от 8 до 10 га. При этом шесть карт (поля: 1, 10-14) площадью около 60 га были засеяны хлопчатником, а оставшиеся 10 карт (поля: 2-9, 15, 16) площадью около 100 га – озимой пшеницей.

Полив на хлопковых полях проводился по бороздам, а пшеницы по полосам. На поле №1 хлопчатник поливался за вегетацию шесть раз, а на остальных полях пять раз. Поливные нормы на хлопчатнике изменялись от 1140 м^3/га (минимальное значение) до 1410 м^3/га (максимум), а оросительные нормы в пределах 5906 м^3/га до 7283 м^3/га. На озимой пшенице в 2001 году были даны 1-2 полива с нормами от 522 (поле № 7) до 1216 м^3/га (поля 6 и 8). Оросительные нормы составили от 522-1260 до 2510 м^3/га

Только на полях 3, 5 и 9 после уборки пшеницы осуществлялись повторные посевы кукурузы, остальные оставлялись как поля испарители. На двух полях (3 и 5) до посева проводился влагозарядковый полив нормами 824 и 965 м^3/га. Поливные нормы для посевов кукурузы изменялись в пределах от 1036 м^3/га до 1550 м^3/га, а оросительные – 2306–2657 м^3/га.

Во время поливов всех видов сельхозкультур сбросы с поливных участков составляли 125–267 м^3/га (10-12 % от оросительной нормы).

С апреля 2001 года по апрель 2002 года, общий водный баланс территории складывался в следующем порядке:

- Сумма приходных статей баланса составила 16052 м^3/га, из которых на долю водоподачи приходится 8417 м^3/га, в том числе 6700 м^3/га в вегетационный период и 1947 м^3/га (77,5 %) в межвегетационный период. Величина подземного притока достигает 4359 м^3/га, а атмосферных осадков 2186 м^3/га
- Сумма расходных статей баланса составила 16217 м^3/га. Невязка баланса равна 165 м^3/га. В расходной части общего баланса суммарное испарение (эвапотранспирация) достигает 8529 м^3/га (56,4 %), из которых 7797 м^3/га приходится на долю вегетационного периода. Эвапотранспирация за вегетацию рассчитана по данным метеостанции «Фергана». Величина дренажного стока равна – 3417 м^3/га (1436 м^3/га за невегетацию), а подземного оттока – 2344 м^3/га. Разность между притоком и оттоком составляет 2005 м^3/га (табл. 5).

Таблица 5. Общий водно-солевой баланс орошаемой территории опытного участка фермерского хозяйства «Азизбек-1» в период IV(2002) – III(2003)

Приход											
месяцы	V		P_r		E+Tr		(I-O)		W		Приток солей
	м^3/га	т/га	м^3/га	т/га	м^3/га	т/га	м^3/га	т/га	м^3/га	т/га	т/га
IV	1166	0,58	135	0,04	473	-	0		17	0,01	0,63
V	665	0,33	348	0,11	770	-	0		352	0,12	0,57
VI	578	0,29	153	0,05	1526	-	711	0,25	274	0,10	0,68
VII	1596	0,80	14	0,00	1781	-	803	0,28	0	0,00	1,08
VIII	1326	0,66	7	0,00	1683	-	1402	0,49	0	0,00	1,16
IX	232	0,12	208	0,07	1080	-	1004	0,35	0	0,00	0,53
X	807	0,40	155	0,05	591	-	0	0,00	85	0,03	0,48
XI	0	0,00	81	0,03	177	-	276	0,10	102	0,04	0,16
XII	0	0,00	504	0,16	76	-	0	0,00	188	0,07	0,23
I	449	0,22	37	0,01	64	-	0	0,00	0	0,00	0,24
II	592	0,30	272	0,09	112	-	162	0,06	0	0,00	0,44
III	1006	0,50	272	0,09	196	-	0	0,00	72	0,03	0,62
Всего	8417	4,21	2186	0,70	8529	-	4359	1,53	1090	0,38	6,82

Расход								
Месяцы	-(I-O)		D		-W		Отток солей	Солевой режим участка
	м^3/га	т/га	м^3/га	т/га	м^3/га	т/га	т/га	т/га
IV	517	1,91	328	0,91	0	0,00	2,82	-2,19
V	244	0,90	351	0,97	0	0,00	1,88	-1,31
VI	0	0,00	190	0,53	0	0,00	0,53	0,16
VII	0	0,00	215	0,60	172	0,48	1,07	0,01
VIII	0	0,00	347	0,96	505	1,40	2,36	-1,20
IX	0	0,00	296	0,82	68	0,19	1,01	-0,47
X	174	0,64	282	0,78	0	0,00	1,42	-0,94
XI	0	0,00	282	0,78	0	0,00	0,78	-0,62
XII	460	1,70	156	0,43	0	0,00	2,13	-1,91
I	163	0,60	214	0,59	46	0,13	1,32	-1,09
II	0	0,00	388	1,07	526	1,46	2,53	-2,09
III	786	2,91	368	1,02	0	0,00	3,93	-3,31
Всего	2344	8,67	3417	9,47	1317	3,65	21,79	-14,97

Примечание: V: водоподача; P_r: атм.осадки; $E+T_r$: эвапотранспирация; ± (I-O): приток и отток грунтовых вод; ±W: общие изменения запаса влаги в рассматриваемой зоне; D: дренаж

При этом в вегетационный период идет подпитка (приток) грунтовых вод в зону аэрации, величина которой в среднем по территории составляет порядка 2075 м^3/га. В невегетационный период идет отток (переток) из зоны аэрации в грунтовые воды в размере 1942 м^3/га, а в годовом разрезе формируется положительный водный баланс с притоком ненасыщенной зоны – 133 м^3/га.

Несколько по другому складывается водный баланс почвенных вод орошаемого поля под хлопчатником, где водопоступление на 30 % больше, чем на других полях. Здесь водный баланс в годовом разрезе отрицательный (-3415 м^3/га.) и только в мае и августе положительный – 1023 и 1130 м^3/га соответственно (табл. 6).

Солевой баланс территории хозяйства в целом и орошаемого поля под хлопчатником (поле №13) складывается в соответствии с их водным балансом. Солевой баланс территории в годовом разрезе сложился отрицательно с незначительным выносом солей 4,4 т/га, а в вегетацию наблюдается их накопление в зоне аэрации до 15,4 т/га. Рассоление почвогрунтов зоны аэрации обеспечивается в зимне-весенний период за счет промывки, влагозарядковых поливов и осадков. В результате вынос солей достигает до 20,3 т/га.

Таблица 6. Баланс почвенных вод по демонстрационному полю №13 на территории опытного участка хозяйства «Азизбек-1» Ахунбабаевского района Ферганской области (2001-2002 гг.)

Месяц	$P_г$	V	-Wn	приход	$E+T_г$	Wn	расход	±q
IV	100	0	880	980	531	0	531	-449
V	34	0	176	210	1 233	0	1 233	1 023
VI	150	2 838	0	2 988	1 844	880	2 724	-264
VII	103	2 439	132	2 674	2 052	0	2 052	-622
VII	100	1 122	0	1 222	1 296	1 056	2 352	1 130
IX	70	0	836	906	841	0	841	-65
X	160	1625	0	1 785	614	1 144	1 758	-27
XI	83	0	946	1 029	176	0	176	-853
XII	457	0	880	1 337	70	0	70	-1 267
I	365	0	528	893	59	0	59	-834
II	262	1 187	0	1 449	102	1 056	1 158	-291
III	103	1 299	0	1 402	187	506	506	-896
Итого	1 987	10 510	4 378	16 875	8 818	4 642	13 460	-3 415

Примечание: $P_г$: атм.осадки; V: водоподача; ±Wn: изменение запаса почвенной влаги; $E+T_г$: эвапотранспирация; ±q: вертикальный обмен между почвенными и грунтовыми водами.

Аналогичная картина складывается и на поле №13 под хлопчатником. Здесь темп выноса, как в годовом разрезе, так и в межвегетацию несколько больше и соответственно составляет 8,31 т/га и 24,31 т/га, а в летние месяцы идет процесс накопления солей до 15-16 т/га. Несколько усиленный темп выноса объясняется большим размером водоподачи на поле по сравнению с таковой на общей территории и, особенно, в межвегетационный период. Результаты солевого баланса хлопкового поля показывают возможность сократить размеры водоподачи в невегетационный период без особого ущерба процессам рассоления почвогрунтов на 40-50 %, т. е. вместо эксплуатационной промывки нормой 2,0-2,5 тыс. м^3/га ограничится вла-

гозарядковым поливом 1000-1200 м^3/га. Обычно направленность общего и частных водно-солевых балансов дренированных орошаемых земель определяется водопоступлением. В соответствии с этим водно-солевые балансы поля и зоны аэрации поливных участков совмещенного посева (пшеницы с кукурузой) формируются идентично с таковыми хлопкового посева. В то же время водно-солевые балансы полей пшеницы, оставленных после их уборки, в виде «чистого пара» складываются несколько по-другому. Так водно-солевые балансы по полю №5 с совмещенными посевами сложились по отрицательному типу с оттоком воды порядка 911 м^3/га, а солей - 10,17 т/га в год, тогда как по полю №2 с посевами только пшеницы – положительно с накоплением солей – 11,66 т/га в год. Между тем указанная интенсивность накопления солей в зоне аэрации складывалась при минерализации поливной воды 0,35-0,4 г/л, а грунтовых вод – 2,8-3,6 г/л.

Следует отметить, что по такому типу сложился водно-солевой баланс зоны аэрации полей №5 и №2. На поле №5 формировался отрицательный водный баланс зоны аэрации с инфильтрацией поливных вод в грунтовые воды «q» в размере – 2088 м^3/га в год. На поле №2 баланс сложился положительно с притоком воды из грунтовых вод в зону аэрации в объеме – 3175 м^3/га (рис. 5). Анализ инфильтрации по балансам показывает, что водно-солевые балансы отдельных поливных участков складываются по разному, несмотря на идентичную дренированность, даже при ограниченной площади хозяйства – всего 160 га. На территории фермерского хозяйства «Азизбек-1» более чем на половине площадей орошаемых земель под посевами пшеницы без высева повторных культур сложился положительный солевой режим, хотя территория высоко дренирована и закрытый дренаж здесь работает более 40 лет. С другой стороны собранные данные свидетельствуют, что даже на хорошо дренированной территории с большой продолжительностью работы дренажа, необходимо удовлетворять требования промывного режима орошения на засоленных землях, чтобы не допустить реставрации засоления.

Среднегодовой дренажный модуль по пилотному хозяйству в 2001 году составил 0,1 л/с/га, изменяясь от 0,075 до 0,13 л/сек/га, во внутригодовом разрезе максимальная величина соответствует вегетационному периоду и весенним влагозарядковым поливам. Дренажный модуль на современном уровне в 2,0-2,5 раза меньше, чем таковой в 1962-1964 гг., что связано с упорядочением водоподачи (в основном за счет снижения нормы промывок и перехода на влагозарядковые поливы взамен промывок).

Расходы дрен колеблются в широких пределах, как во внутригодовом, так и внутримесячном разрезе. Максимальные расходы наблюдаются по закрытой дрене УД-2 (участковая дрена), где они изменяются в пределах от 3,1-5,25 до 8,5-12,5 л/с, максимальное значение которых приходится на вегетационный, а минимальное на осенне-зимний период года. Минимальные расходы дрен формируются по дрене В-1 из гофрированных пластмассовых труб, заложенных на глубине 2,4 м и дрене У-1а длиной 800 м (асбестоцементных труб) глубиной в устье – 3,2 м. Расходы этих дрен изменяются в

пределах 0,8-1,5 л/сек (осенне-зимний период) до 3,0-6,5 л/сек. В осенние периоды года в дрене В-1 из пластмассовых труб приток прекращается из-за глубокого залегания грунтовых вод (h ≤ 2,3-2,4 м). Несмотря на усиленную работу дренажа в период полива общее направление потока грунтовых вод формируется в сторону Средне-Кызылтепинского коллектора (табл. 7).

Таблица 7. Изменение дренажного стока на территории фермерского хозяйства «Азизбек-1» площадью 160 га (1.04.02 – 31.03.03)

Месяц	Наименование дрен							К-2 (10 га)	
	УД-1 ($м^3$)	УД -1А ($м^3$)	В-1 ($м^3$)	УД -2 ($м^3$)	УД -3 ($м^3$)	Итого ($м^3$)	Дренажный сток ($м^3$/га)	УД -1 ($м^3$)	Дренажный сток ($м^3$/га)
IV	11095	5320	5779	18454	11872	52520	328	11095	277
V	10880	4832	5095	22574	12716	56097	351	10880	272
VI	8108	3903	1821	11666	4831	30329	190	8108	203
VII	7890	4680	3324	14482	4061	34437	215	7890	197
VIII	12176	8129	7026	23295	4902	55528	347	12176	304
IX	11108	5295	4164	21522	5216	47305	296	11108	278
X	10477	4602	4479	20131	5404	45093	282	10477	262
XI	10035	5867	3179	18956	7104	45141	282	10035	251
XII	6206	3161	0	12734	2900	25001	156	6206	155
I	4436	2476	5800	12734	8820	34266	214	4436	111
II	10375	16386	4289	20931	10103	62084	388	10375	259
III	11631	6750	5800	26515	8120	58816	368	11631	291
За год	114417	71401	50756	223994	86049	546617	3416	114417	2860

Месяц	К-13 (10 га)				К-5 (10 га)			
	УД-2 ($м^3$)	УД -3 ($м^3$)	Сумма ($м^3$)	Дренажный сток ($м^3$/га)	УД -1 ($м^3$)	УД -2 ($м^3$)	Сумма ($м^3$)	Дренажный сток ($м^3$/га)
IV	18454	11872	30326	379	11095	18454	29549	369
V	22574	12716	35290	441	10880	22574	33454	418
VI	11666	4831	16497	206	8108	11666	19774	247
VII	14482	4061	18543	232	7890	14482	22372	280
VIII	23295	4902	28197	352	12176	23295	35471	443
IX	21522	5216	26738	334	11108	21522	32630	408
X	20131	5404	25535	319	10477	20131	30608	383
XI	18956	7104	26060	326	10035	18956	28991	362
XII	12734	2900	15634	195	6206	12734	18940	237
I	12734	8820	21554	269	4436	12734	17170	215
II	20931	10103	31034	388	10375	20931	31306	391
III	26515	8120	34635	433	11631	26515	38146	477
За год	223994	86049	310043	3876	114417	223994	338411	4230

На участке формируются испарительно-ирригационно-дренажный тип режима грунтовых вод с определенным значением подземного притока. Уровни и режим грунтовых вод на участке стабилизировались в зависимости от режима работы оросительных систем и водопоступления на территорию. Глубокое залегание грунтовых вод приходится зимний период

(h = 2,25-2,50 м), когда нет поливов, либо проводится полив только озимой пшеницы. Начиная с февраля, идет медленный подъем грунтовых вод, связанный с проведением промывок и влагозарядковых поливов под посев хлопчатника и других культур. В вегетационный период (апрель-июнь) среднемесячный уровень грунтовых вод колеблется от 2,04 до 2,24 м.

Минимальные и максимальные значения уровня грунтовых вод на полях под посевами хлопчатника и пшеницы объясняются их расположением относительно дрен и Средне-Кызылтепинскогo коллектора: на картах расположенных вблизи дрен, уровень на 0,25-0,4 ниже, чем в междреньях.

Минерализация грунтовых вод на пилотном участке повсеместно стабилизировалась на уровне 3,0-3,8 г/л по сумме токсичных солей и 0,06-0,1 г/л по хлору, против 5,8-10 г/л в исходном положении. По химическому составу грунтовые воды относятся к сульфатному типу. Общая минерализация грунтовых вод по периодам года изменяется незначительно: превышение составляет +0,2-0,5 г/л.

Минерализация оросительной воды колеблется от 0,37 до 0,47 г/л. Из-за очень слабой минерализации грунтовых вод и подаваемой на поля оросительной воды при промывном режиме орошения в почвогрунтах не наблюдается процесс реставрации засоления: солесодержание в корнеобитаемой зоне (0-1,5 м) изменяется в пределах 0,9-1,1 % от веса сухой почвы по сумме солей, тогда как в исходном состоянии оно превышало 3,0-3,5 %, а местами достигало 4,5-5,0 %. (рис. 5).

Таким образом, результаты исследований в рамках данного проекта показывают возможность перехода на более жесткую водоподачу в межвегетационный период, если территория обеспечена хорошо работающим дренажем со среднегодовым модулем 0,1 л/с/га. При этом посевы зерновых обязательно должны совмещаться с посевами других сельхозкультур, что даст возможность ликвидировать реставрацию засоления при относительно близком залегании грунтовых вод – до 2,5 м.

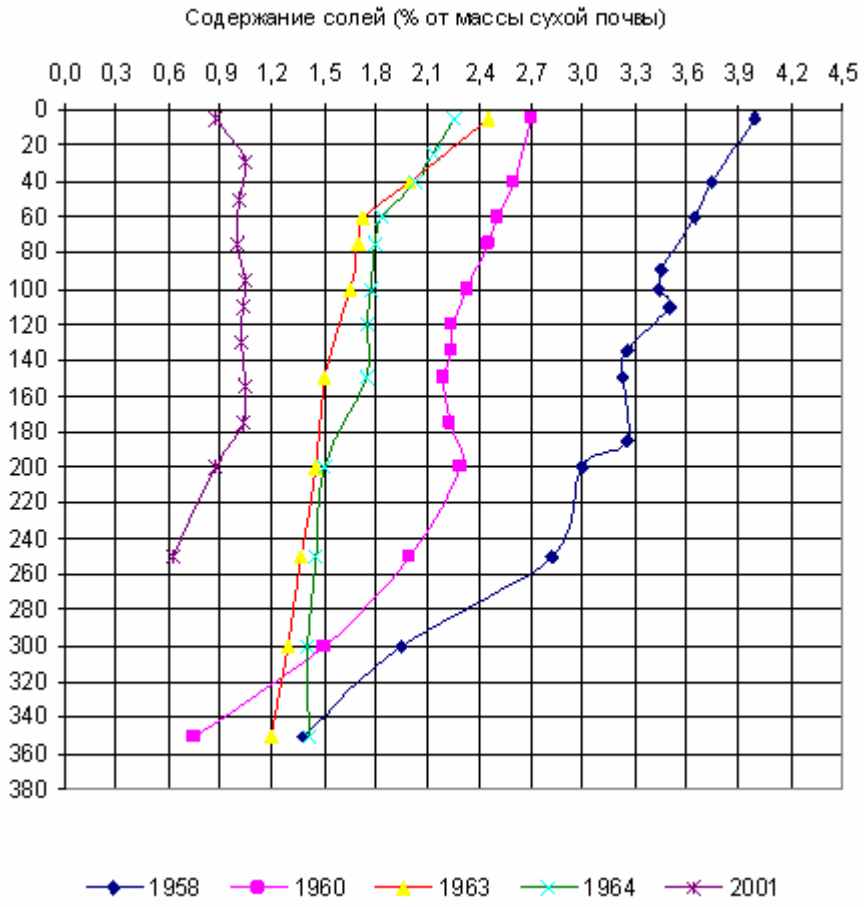


Рис. 5. Изменение содержания солей в почвогрунтах

Библиография

Аверьянов С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель, Москва: Колос, 1978, 268 с.

Айдаров И.П. Регулирование водно-солевого и питательного режима орошаемых земель, Москва: Агропромиздат, 1985, 302 с.

Веригин Н.Н., Шулгин Д.Ф. и др. Методы прогноза солевого режима грунтовых вод, Москва: Колос, 1979, 335 с.

Голованов А.И. Прогноз водно-солевого режима и расчет дренажа орошаемых земель: Автореферат диссертации докт. техн. наук, Москва, 1975

Духовный В.А., Баклушин М.Б. и др. Горизонтальный дренаж орошаемых земель, Москва: Колос, 1979, 254 с.

Духовный В.А. Ирригационные комплексы на новых землях Средней Азии, Ташкент, Узбекистан 1983, 184 с.

Духовный В.А., Якубов Х. и др. Дренаж в бассейне Аральского моря в направлении стратегии устойчивого развития, Ташкент, 2004

Духовный В.А, Якубов Х., Умаров П.Д. Многофакторная классификация применения комбинированного дренажа при его проектировании, Москва: 1982, экспресс-информация, серия 9, выпуск 5

Еременко Г.В., Усманов А.У. и др. Мелиоративная эффективность и перспектива развития горизонтального дренажа в Узбекистане, Ташкент, 1975, Вып. II, с. 32-50.

Икрамов Р.К. Принципы управления водно-солевым режимом орошаемых земель Средней Азии в условиях дефицита водных ресурсов, Ташкент, «Гидроингео» 2001, 191 с.

Ковда В.А. Происхождение и режим засоления почв - Москва, Изд. АН СССР, 1946-1947, т. 1, 2.

Панкова Е.И., Айдаров И.П. и др. Природные и антропогенное засоление бассейна Аральского моря (география, генезис, эволюция), Москва, Колос, 1996, 186 с.

Решеткина Н.М. Гидрогеологические основы вертикального дренажа, Ташкент: Изд-во ФАН, 1960 г., 143 с.

Решеткина Н.М., Якубов Х.И. Вертикальный дренаж, Москва: Колос, 1978, 320 с.

Якубов Х.И. Мелиорация засоленных земель на фоне вертикального дренажа, Ташкент: «Мехнат», 1990, 190 с.

Якубов Х.И., Умаров П.Д. Управление водоподачей как средством формирования устойчивого баланса орошаемых земель в условиях напорных подземных вод, Алматы/Ташкент, 2003

Глава 16.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОРОШЕНИЕМ И ДРЕНАЖЕМ

В.А. Духовный[26], Х.И. Якубов[26], П.Д. Умаров[26]

Реферат: Орошение немыслимо без дренажа – естественного или искусственного – для создания условий по поддержанию необходимого водно-солевого режима почв. В аридной зоне соотношение дренажа и орошения обеспечивает предотвращение соленакопления в корневой зоне для поддержания надлежащих влажностных условий почвы, определяет возможность минимальных расходов воды на единицу продукции и площади, а

[26] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, г. Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11. dukh@icwc-aral.uz

также создает возвратный сток в реки, с минимальным воздействие на качество воды. Но одновременно сочетание дренажа и орошения создает неравномерность (гетерогенность) воздействия на возделываемые площади и может привести к значительным отклонениям от расчетных параметров водопотребления и параметров дренажного стока. Все эти аспекты обсуждаются в данной статье.

Ключевые слова: дренаж, орошение, мелиоративные режимы, водосолеобмен, почвы, грунтовые воды.

Введение

В процессе образования земной коры в геоморфологическо-литологической структуре сформировались строго определенные режимы водно-солевого обмена. Их интенсивность определяется природно-климатическими условиями (например, влагообеспеченность и испарение) и геоморфологическими особенностями, формируя индивидуальный природный комплекс, характеризующийся степенью естественной дренированности территории с определенным поверхностным и подземным стоком.

Орошение сельхозкультур при существующих способах полива закономерно вызывает потери воды на всех звеньях ирригационной сети и на полях, что приводит к изменению естественных режимов и уровня грунтовых вод и процессов соленакопления в почве. В зависимости от мощности естественного оттока подземных вод, а также интенсивности испарения воды, эти изменения могут привести (или нет) к созданию определенных типов и мощностей дренажа и других мероприятий для предотвращения неблагоприятного влияния развития орошаемого земледелия.

В Центральной Азии по природно-климатическим признакам выделяются две крупные ландшафтно-экологические зоны:

- подгорные равнины, включая
  - речные террасы рек верхнего (частично среднего) течения, подгорные равнины, хорошо дренированные в естественных условиях;
  - волнистая предгорная равнина с интенсивной дренированностью;
  - конуса выноса, верхняя часть которого хорошо дренирована, а нижняя не имеет оттока грунтовых вод.

- пустынные низменности
  - речные террасы (средние и нижние) слабодренированные в естественных условиях;
  - аллювиальные равнины, замкнутые котловины, не имеющие оттока грунтовых вод за пределы;

- дельты приморские, бессточные;
- дельты сухих, мелких и средних рек, имеющие подземные стоки за их пределы.

По гидрогеолого-почвенно-мелиоративным условиям геоморфологические структуры подгорных равнин, за исключением последней гидрогеологической зоны, относятся к разряду интенсивно дренированных территорий с глубоким залеганием (> 5,0 м) слабоминерализованных грунтовых вод (до 1,5-2,0 г/л), а также незасоленными почвогрунтами на большую глубину. В большей части эти районы имеют относительно высокие атмосферные осадки (больше 350-550 мм) и относятся к зонам формирования и транзита подземных вод к нижележащим геоморфологическим структурам. В связи с этим, водно-солевые балансы этих массивов в естественных условиях и при развитии орошаемого земледелия, складываются благоприятно – в них не требуется строительство дренажа, и задача антропогенных мероприятий сводится к обеспечению управления водой в целях минимизации потерь воды на полях и ирригационных системах для предотвращения деградации почв (смыв и эрозия) и дополнительной подпитки нижележащих водоносных горизонтов.

Все районы пустынной зоны и часть конусов-выноса подгорной зоны, включая низкие речные террасы, периферийные части конусов-выноса и крупные депрессии, образованные в аллювиальных равнинах и дельтах рек относятся к слабо- и не дренированным территориям, где в естественных условиях формируются гидроморфные почвы с близкими уровнями высокоминерализованных грунтовых вод (до 3,0 м). Здесь складывается положительный водно-солевой баланс. При этом повсеместно формируется стабильно высокая влажность грунтов зоны аэрации, за исключением верхнего слоя (до 1,0 м), где она подвержена резким изменением и, особенно, в периоды года, когда отсутствуют осадки. Освоение и орошение таких земель лишь ускоряет и усугубляет формирование положительного водно-солевого баланса, что требует строительства искусственного дренажа.

В зоне пустынной низменности с глубоким залеганием высокоминерализованных грунтовых вод (более 3,0-3,5 м), с большими запасами солей в горизонтах, подверженных изменениям в естественных условиях, складывается отрицательный водно-солевой баланс с рассолением почв на глубину до 1,0-1,5 м. При этом, в зависимости от механического состава и сложения почвогрунтов, формируется изменчивый профиль влажности до уровня грунтовых вод. Обычно, верхний слой до 1,5-2,0 м практически иссушен, а ниже влажность изменяется в широких пределах от 12-14 % до 18-20 %. На таких землях при освоении и орошении складывается положительный водный баланс с солевой по типу накопления в зоне аэрации. Процесс подъема УГВ сопровождается ростом их минерализации за счет выщелачивания солей, содержащихся в почвогрунтах.

В целом по территории Центральной Азии земли с естественным дренажом, обеспечивающим достаточный отток в условиях орошения, составляют 37,5 %, на остальной территории требуется искусственный дренаж, интенсивность которого определяется параметрами водно-солевых балансов орошаемой территории, зоны аэрации и грунтовых вод.

Под влиянием естественных процессов влагообмена на неорошаемых территориях устанавливается достаточно стабильный водный баланс, определяемый интенсивностью естественного испарения, осадков, оттока в реку, притока с вышележащих территорий и фильтрации в подстилающие напорные пласты, при котором складываются естественные режимы грунтовых вод (рис. 1). При этом изменчивость уровней и минерализации грунтовых вод обусловлена колебаниями осадков, режимами естественных водотоков, процессами естественного переноса солей и их аккумуляции, а также подтоплением во время паводков или осушением во время засух.

Человеческая деятельность, особо водное хозяйство и орошение, вносит значительные коррективы в естественные гидрогеологические процессы, которые проявляются в подъеме или снижении уровней грунтовых вод, увеличении подтопления. Кроме того, здания, коммуникации и другие объекты по-разному влияют на режимы грунтовых вод на их взаимодействие с рекой. Орошение резко изменяет естественный режим и создает динамичные условия переформирования бытовых циклов, которые в последующем стабилизируются при новых скоростях водооборота и интенсивностях влагообмена между поверхностным слоем и более глубокими слоями почвы в зоне аэрации, между зоной аэрации и грунтовыми водами и, наконец, между грунтовыми водами и сбросной сетью, а также реками, озерами и бессточными впадинами (рис. 2).

Характер элементов водного баланса зоны аэрации и грунтовых вод зависит от КПД оросительной системы, техники полива, засоленности почвогрунтов и требований на их промывку, фильтрационных свойств, условий взаимосвязи грунтовых вод орошаемого массива с прилегающими водоносными горизонтами. При этом КПД системы, техника полива и промывная норма являются первично управляемыми факторами, а их взаимосвязь с грунтовыми водами – следствием изменения уровня грунтовых вод на массиве, который можно регулировать дренажем.

Различия в прохождении гидрогеолого-мелиоративных процессов определяются, в основном, различиями в геоморфологическом строении ландшафтов, степенью естественной дренированности и величиной притока подземных вод с окружающей территории. Последние зачастую создают первичную напорность грунтовых вод, которая дополняется вторичной, возникающей при наполнении систем и крупных магистральных каналов, которые имеют хорошую гидравлическую связь с подземными водами.

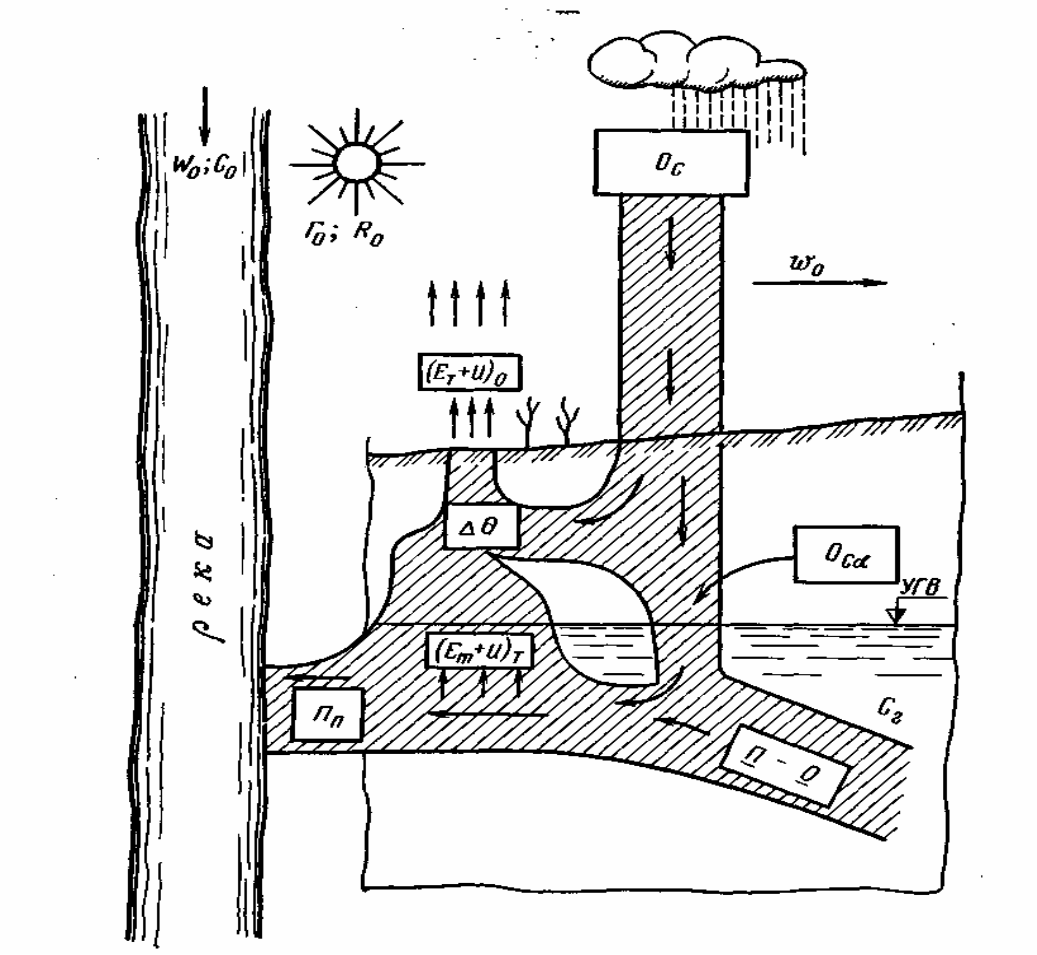


Рис.1. Взаимодействие (динамика) естественных вод при отсутствии орошения

P_r - атмосферные осадки; $E_t = E + T_r$ – эвапотранспирация; ω_0, r_0, R_0 - скорость ветра, относительная среднемесячная влажность и радиационный баланс, соответственно; Δq – вертикальный водообмен; $P_{r\alpha}$ – просачивание атмосферных осадков; E_{gw} – испарение с грунтовых вод; GWT - УГВ; I – подземный приток в реку; I – O подземный приток и отток

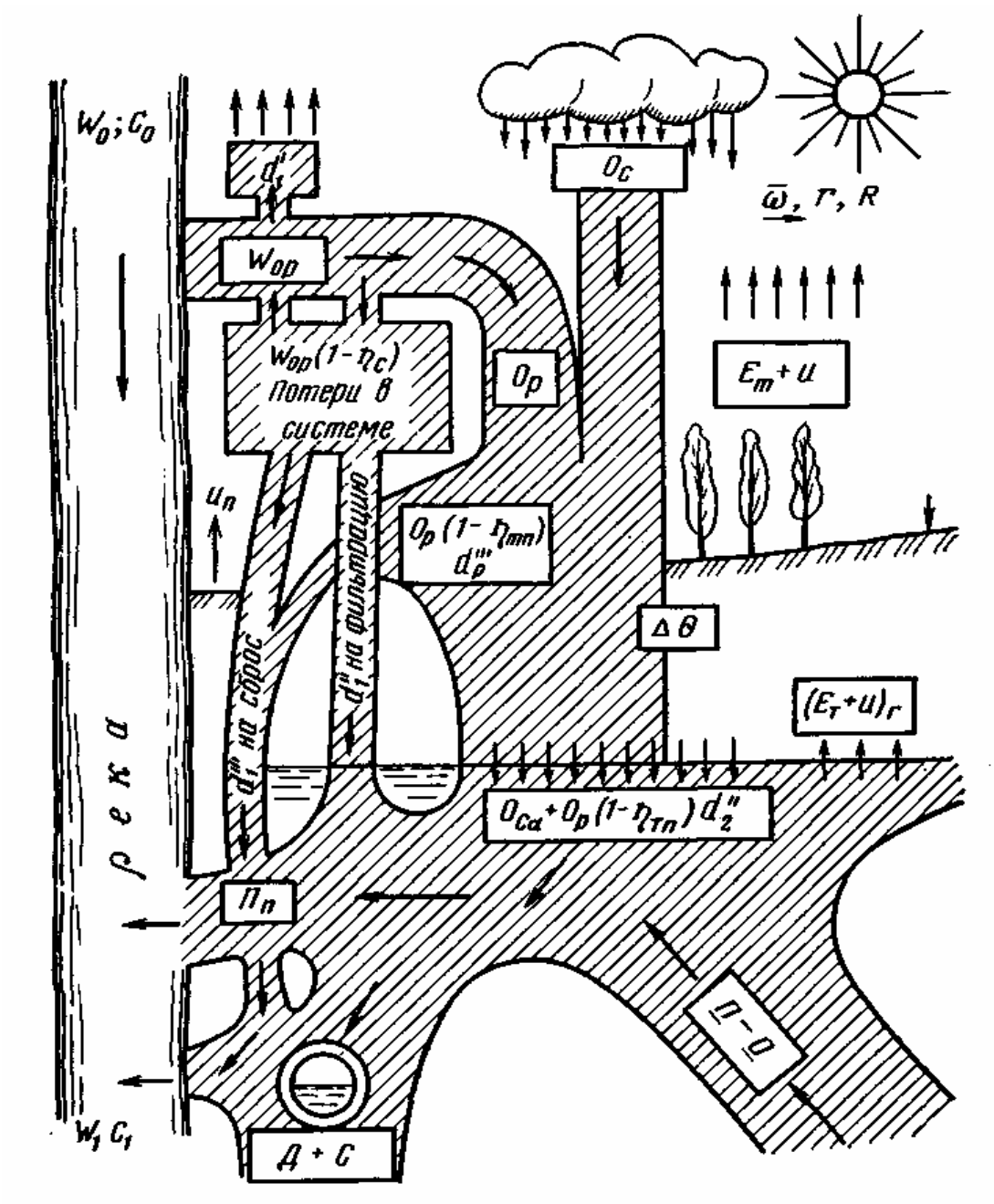


Рис.2. Взаимодействие орошения и дренажа в оросительных системах

P_r - осадки; W_{ir} – водозабор из реки; $W_{ir}(1-\eta_{ir})$ – потери на системе, из них d_1- потери на испарение с оросительной сети, d_1 – потери на фильтрацию, d_1 – потери на транзит.сброс; I_r – оросительная вода; $I_r(1-\eta_{it})d_w$ – потери в поле, $E_t = E + T_r$ эвапотранспирация; E_{gw} – испарение с грунтовых вод; ω_0, r, R - скорость ветра, относительная среднемесячная влажность и радиационный баланс, соответственно; Δq – вертикальный водообмен; $P_{r\alpha} + I_r(1-\eta_{it})d_2$ – просачивание с орошаемого поля; I – подземный приток в реки; I - O подземный приток - отток; D + s – дренажно-сбросные воды

С позиций требований дренажа, опасны зоны, где интенсивность естественного подземного оттока меньше суммарной инфильтрации и притоков к подземным водам или где подземные воды напорные и формируют дополнительный подсос в зону аэрации. С этой точки зрения большое значение имеет работа по оценке величины «притока-оттока» грунтовых вод (I – O) и особенно, подземного притока напорных вод для установления потребной мощности искусственного дренажа – D_o. В таблице 1 приводятся значения подземного притока-оттока по зонам планирования в бассейнах Сырдарьи и Амударьи.

Таблица 1. Уравнения водного баланса

Условия	Баланс	Уравнения	Номер
В естественных условиях (без орошения)	Общий	$\Delta W = (\bar{I} - \bar{O}) + (\underline{I} - \underline{O}) + (P_r - I_f) - E_w - (E + T_r) \pm p$	1
	Зоны аэрации	$\Delta W_a = (\bar{I} - \bar{O}) + (P_r - I_f) - E_w - (E + T_r) \pm q$	2
	Грунтовых вод	$\Delta W = (\underline{I} - \underline{O}) \pm q \pm p$	3
При орошении (без дренажа)	Общий	$\Delta W = (\bar{I} - \bar{O}) + (\underline{I} - \underline{O}) + (P_r - I_f) + (V_i - w_w) - E_w - (E + T_r) \pm p$	4
	Зоны аэрации	$\Delta W_a = (\bar{I} - \bar{O}) + (P_r - I_f) - E_w - (E + T_r) + (V_i - w_w) + (1 - a)F_c \pm q$	5
	Грунтовых вод	$\Delta W_{gw} = (\underline{I} - \underline{O}) + F_c \pm q \pm p$	6
При орошении и дренаже	Общий	$\Delta W = (\bar{I} - \bar{O}) + (\underline{I} - \underline{O}) + (P_r - I_f) + (V_i - w_w) - (E + T_r) - E_w - D \pm p$	7
	Зоны аэрации	$\Delta W_a = (\bar{I} - \bar{O}) + (P_r - I_f) - E_w - (E + T_r) + (V_i - w_w) + (1 - a)F_c \pm q$	5 вт.
	Грунтовых вод	$\Delta W_{gw} = (\underline{I} - \underline{O}) + aF_c \pm q \pm p$	8

ΔW: суммарное изменение запасов воды в границах балансового участка за расчетный период; $\bar{I}$: приток поверхностных вод; $\bar{O}$: отток поверхностных вод за пределы балансового участка; $\underline{I}$: приток грунтовых вод; $\underline{O}$: отток грунтовых вод; P_r: атмосферные осадки; I_f: поверхностный сток; E_w: испарение поверхностных вод; $(E+T_r)$: испарение и транспирация из почвы; $\pm p$: вертикальный водообмен балансового слоя с глубокими подземными водами (знак «+» - восходящее напорное питание, знак «-» - нисходящий поток грунтовых вод); ΔW_a: изменение запасов влаги в зоне аэрации в границах балансового участка за расчетный период; $\pm q$: вертикальный водообмен между почвенными и грунтовыми водами; ΔW_{gw}: изменение запасов грунтовых вод в пределах балансового участка за расчетный период; V_i: водоподача оросительной воды; w_w: сброс с поверхности полей; F_c: фильтрационные потери из каналов; a: коэффициент, выражающий долю от фильтрации из каналов, идущую на питание грунтовых вод; (1-a): коэффициент, выражающий долю от фильтрации из каналов, идущую на пополнение запасов в зоне аэрации; D: дренажный сток.

Характерно, что подгорные и межгорные долины, где расположен и наш объект исследования, характеризуются большими величинами разницы в притоке-оттоке (Ферганская область – около 5000 м^3/га), большая часть которого приходится на осенне-зимний период. Величина ежегодного напорного питания составляет для непосредственно нашего участка 2500 м^3/га, что также подтверждается по модели RZQWM (Стулина и др.., 2005), где эта величина составляет 248 мм в год. Этим объясняется тот факт, что зачастую объем дренажного стока (как сумма антропогенного и естественного притока-оттока) превышает объем водоподачи.

Водно-солевые балансы орошаемой территории, зоны аэрации и грунтовых вод

Для характеристики процессов взаимодействия орошения и дренажа очень важно составление наряду с общим балансом воды и солей орошаемой территории также составление балансов зоны аэрации и грунтовых вод. Объем и параметры искусственного дренажа определяются анализом водно-солевых балансов на современном уровне и их изменением на перспективу прогнозным расчетом.

Водно-солевые балансы отражают разность между суммарным поступлением и расходованием воды и солей, равную изменению их запасов в пределах балансового участка за определенный период времени. В зависимости от поставленных задач могут быть рассмотрены балансы орошаемых массивов, отдельных хозяйств и участков. В каждом конкретном случае определяются пространственные границы балансового участка, расчетный период времени и источники поступления воды. Балансовыми расчетами устанавливается направленность изменения эколого-мелиоративных процессов при развитии орошаемого земледелия (изменение влаго- и солезапасов), интенсивность подпитки – переноса воды из зоны аэрации в грунтовые воды, скорости подъема грунтовых вод и динамика их минерализации и необходимые мероприятия по управлению ими.

Взаимосвязь между почвенными, поверхностными и грунтовыми водами объясняется через балансовые уравнения, приведенные в табл. 1 и 2.

Если общими водно-солевыми балансами (табл. 1 и 2) устанавливается количественное и пространственное изменение водно-солевых запасов и динамика на орошаемых землях, то уравнениями зоны аэрации и грунтовых вод определяется величина водо- и солеобмена между почвенными слоями, грунтовыми и подземными водами. По этим количественным значениям водо-солеобмена дается оценка интенсивности водно-солевых процессов, протекающих на орошаемом поле, и устанавливаются оптимальные оросительные и промывные нормы, при которых обеспечивается необратимый процесс рассоления почвогрунтов зоны аэрации и верхнего слоя грунтовых вод. Для этого необходимо определить оптимальные мелиоративные режи-

мы, при которых на полях создается минимальный водообмен между корнеобитаемым слоем, зоной аэрации и грунтовыми водами.

Таблица 2. Уравнения солевого баланса

Условия	Баланс	Уравнения	Номер
В естественных условиях (без орошения)	Общий	$\Delta S = (S_{\bar{I}} - S_{\bar{O}}) + (S_{\underline{I}} - S_{\underline{O}}) + S_{\Delta} \pm S_p$	9
	Зоны аэрации	$\Delta S_a = (S_{\bar{I}} - S_{\bar{O}}) + S_{\Delta} \pm S_q$	10
	Грунтовых вод	$S_{gw} = (S_{\bar{I}} - S_{\bar{O}}) + S_p \pm S_q$	11
При орошении (без дренажа)	Общий	$\Delta S = (S_{I} - S_{O}) + (S_I - S_O) + S_a + S_i - S_f \pm S_p$	12
	Зоны аэрации	$\Delta S_a = (S_{\bar{I}} - S_{\bar{O}}) + S_a + S_i + S_f \pm S_q$	13
	Грунтовых вод	$\Delta S_{гр} = (S_{\underline{I}} - S_{\underline{o}}) + S_f \pm S_q + S_p$	14
При орошении и дренаже	Общий	$\Delta S = (S_{I} - S_{O}) + (S_{\underline{I}} - S_{\underline{O}}) + S_a + S_f - S_w - S_d \pm S_p$	15
	Зоны аэрации	$\Delta S_a = (S_{\bar{I}} - S_{\bar{O}}) + S_a + S_i + S_f \pm S_q$	13 вт.
	Грунтовых вод	$\Delta S_{gw} = (S_{\underline{I}} - S_{\underline{o}}) + S_f \pm S_d \pm S_q \pm S_p$	16

ΔS: суммарное изменение запасов солей в границах балансового участка за расчетный период; S_I: поступление солей с поверхностными водами; S_o: вынос солей поверхностными водами за пределы балансового участка; $S_{\underline{I}}$: поступление солей с притоком грунтовых вод; $S_{\underline{o}}$: вынос солей с оттоком грунтовых вод; S_a: поступление солей с атмосферными осадками; ±Sp: поступление или вынос солей при вертикальном водообмене с глубокими горизонтами подземных вод; ΔS_a: изменение запасов солей в зоне аэрации; $\pm S_q$: поступление или вынос солей при вертикальном водообмене между почвенными и грунтовыми водами; ΔS_{gw}: изменение запасов солей в горизонте грунтовых вод; S_i: поступление солей с оросительными водами; S_f: поступление солей с фильтрационными потерями из каналов; S_d: вынос солей с дренажным стоком.

Мелиоративный режим и его связь с водопотреблением и дренажем

Под мелиоративными режимами в советской мелиоративной науке (Решеткина,1965) подразумевается такое сочетание искусственного и естественного дренажа, водоподачи и агротехники, которое определяет взаимодействие оросительных и грунтовых вод и влияет на величину суммарного испарения с орошаемых полей, а стало быть, и водоподачу.

Мелиоративные режимы устанавливаются путем подбора и поддержания уровня грунтовых вод с учетом их минерализации и соответствующих оросительных норм путем комплекса гидротехнических, агротехнических мероприятий. Классификация этих режимов дана Духовным В.А. (1983),

Якубовым Х.И. и Икрамовым Р.К. (1983). Главным критерием является система подпитки грунтовых вод и зоны аэрации.

При этом мелиоративные режимы (таблица 3) должны соответствовать природным условиям территории, где развивается орошаемое земледелие. В принципе на орошаемых массивах могут быть созданы все четыре типа мелиоративных режимов. Однако для их создания требуются различные водно-экономические параметры.

Таблица 3. Основные характеристики мелиоративных режимов

Мелиоративный режим	Характер взаимодействия с грунтовыми водами	Питание из грунтовых вод и мелиоративная доля, 1000 м^3/га	Испарение из грунтовых вод, 1000 м^3/га
Автоморфный	Грунтовые воды не участвуют в орошении, инфильтрация идет свободно вниз	$-P < 0{,}05\text{-}0{,}1\ (E+T_г-P_г)$; $M = 0$	0
Полу-автоморфный	Грунтовые воды подпирают инфильтрацию оросительной воды, но сами незначительно участвуют в питании растений	$+P < 0{,}1\text{-}0{,}2\ (E+T_г-P_г)$; $M = 0{,}5\text{-}1{,}0$	0-1,5
Полу-гидроморфный	Грунтовые воды активно участвуют в питании растений, преобладая над долей оросительной воды	$+P > 0{,}3\ (E+T_г-P_г)$; $M \geq 2{,}0$	1,5-3
Гидроморфный	Питание растений в основном происходит за счет грунтовых вод	$+P > (E+T_г-P_г)$; $M \geq 5{,}0$	3-7

P: суммарная инфильтрация; $E+T_г$: эвапотранспирация; M: промывная доля; $P_г$: атм.осадки.

Для обоснования необходимости создания того или иного мелиоративного режима требуется выполнить многовариантные прогнозные и технико-экономические расчеты по установлению оптимальных глубин грунтовых вод, а также состава и параметров мелиоративных мероприятий, при которых обеспечиваются благоприятные условия для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Для регулирования мелиоративного режима почв и его выбора необходимо установить причинно-следственные связи между средой (вода, воздух, содержание солей и питательных веществ в корнеобитаемой зоне), управляющими факторами (водоподача, дренаж, агротехнические приемы и др.) и показателями их взаимодействия (рост и развитие возделываемой культуры). Вместе с тем существует вполне определенные водно-солевые режимы корнеобитаемой зоны, соответствующие биологическим требованиям развития данной сельскохозяйственной культуры (эталон). Поэтому

главная задача заключается в таком регулировании поступления влаги и солей от различных источников, чтобы выбранный водно-солевой режим корнеобитаемой зоны поддерживался с помощью оптимальных средств (орошение, дренаж и др.). Такая задача может быть решена путем анализа формирования и расходования отдельных статей водно-солевого баланса. Балансовый метод обоснования мелиоративных режимов позволяет учесть техническое состояние оросительных и дренажных систем, организацию землепользования, а также рассмотреть статьи формирования водно-солевого режима на орошаемом поле.

За критерий оптимизации выбора параметров мелиоративных режимов приняты рекомендации (Духовный, 1983), при которых выбирается вариант, обеспечивающий минимум приведенных затрат при суммарном минимальном расходе воды (орошение + дренаж) на единицу продукции сельскохозяйственной культуры. Результаты обобщенной оценки оптимальных параметров режима для осредненных условий Центральной Азии представлены на рис. 3.

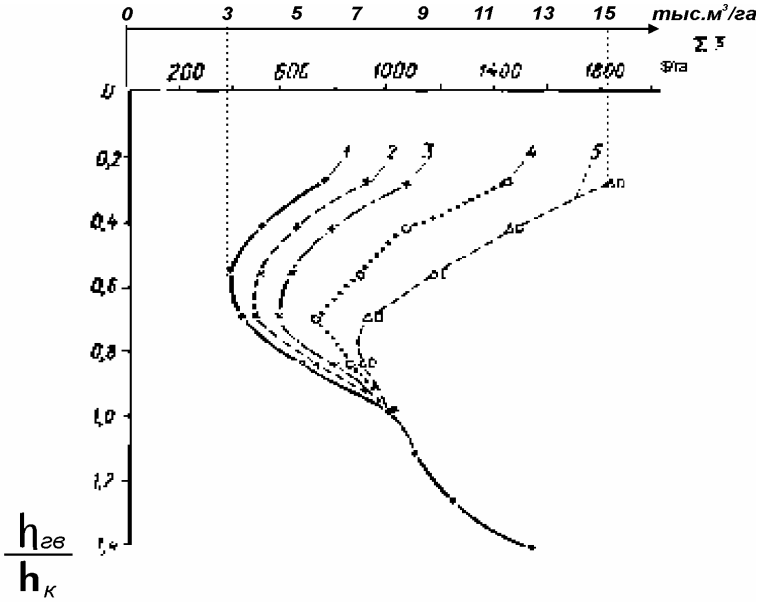


Рис. 3. Оптимизация мелиоративного режима по сумме приведенных затрат с учетом воды и урожая:
1 – С= 1 г/л; 2 – С=2 г/л; 3 – 3 г/л; 5 – 15 г/л.
(а: водоподача, 10^3 м^3/га; С: общая минерализация грунтовых вод, г/л; $h_{гв}$: уровень грунтовых вод, м; h_k: высота капиллярного подъема, м; 1, 2, ..., 5: кривые капитальных вложений в зависимости от $h_{га}$/ h_k и минерализации грунтовых вод (С. г/л); b: чистые капвложения, $/га)

Здесь учитываются капитальные вложения для обеспечения данных параметров, в зависимости от минерализации грунтовых вод и относительно параметра, представляющего отношение уровня грунтовых вод $h_{гв}$ к ве-

личине капиллярного подъема ($h_к$) (Духовный, 1983). Как видно, наиболее выгодным режимом является полугидроморфный при соотношении уровня грунтовых вод к величине капиллярного порога 0,6, что соответствует в условиях Ферганской долины глубине залегания грунтовых вод 1,0-2,0 м при их минерализации 1-2 г/л или 2,2 м при минерализации до 5 г/л. При этом, с ростом минерализации грунтовых вод до 10-15 г/л, необходимо переходить на полуавтоморфный режим с данным соотношением более 0,8 и уровнем грунтовых вод достигающим 2,5 м. В то же время при освоении новых земель с глубоким залеганием УГВ больше 3,5-4,0 м и опресненным почвенным слоем в естественных условиях выгодным является – автоморфный режим, создаваемый путем предотвращения их подъема и вторичного засоления с применением вертикального дренажа, если позволяют природно-гидрогеологические условия.

Для хозяйства «Азизбек-1» существующая мощность дренажа, с чистым дренажным стоком 3400-3700 $м^3$/га в год, обеспечивает достаточно быстрое снижение уровня грунтовых вод при поливе со средней скоростью 5-7 см/день, что гарантирует поддержание уровня грунтовых вод на глубине 1,7-2,2 м в вегетационный период и 2,2-2,57 м в среднегодовом разрезе. Однако, учитывая гетерогенность работы дренажа в сочетании с подачей воды/орошением на отдельное поле в хозяйстве, пространственное поддержание уровней грунтовых вод представляет непростую задачу.

Пространственное сочетание интенсивности дренажа и орошения

Горизонтальный дренаж создает неравномерность уровней грунтовых вод на междреньи, определяемую положением кривой депрессии между дренами в одном измерении и между коллекторами (или коллекторами и дренами) в другом. При этом формируется бугор грунтовых вод, размеры в отметках которого между серединой междренья и над дреной составляет более 1 метра. Естественно, что это определяет необходимость увеличения поливных и оросительных норм вблизи дрен и коллекторов и уменьшения в приближении к бугру грунтовых вод. Поверхностный полив благодаря неравномерности инфильтрации вдоль головы борозды еще усиливает эту неравномерность, создавая повышенное увлажнение в голове борозды и пониженное в конце (Хорст *и др.,* 2005). Это явление описано и исследовано (Духовный, 1984) и может быть определенным образом учтено при расположении поливных борозд относительно междренья.

В рамках проекта в фермерском хозяйстве «Азизбек-1», расположенном в Ферганской области Республики Узбекистан на площади 160 га, была сделана попытка оценить влияние еще одного фактора гетерогенности. Периодичность поливов полей в 15-20 суток создает неравномерную нагрузку на дренаж и растекание бугра фильтрационных вод (бугровидное возвышение зеркала грунтовых вод, создаваемое под влиянием инфильтрации) на ту часть площади, где полив не проводится.

Уровни и режим грунтовых вод на участке стабилизировались в определенном диапазоне в зависимости от режима работы оросительных и дренажных систем. Глубокое залегание уровня грунтовых вод приходится на зимне-весенние периоды (декабрь-февраль месяцы – h = 2,25-2,50 м в 2001 г. и h = 1,75-2,0 м в 2002 г.), когда ирригационная система либо не работает, либо проводится только полив озимой пшеницы. Начиная с февраля, идет медленный подъем грунтовых вод, связанный с проведением промывок и влагозарядковых поливов под посев хлопчатника и других сельхозкультур. В вегетационный период (апрель-сентябрь) среднемесячный уровень грунтовых вод колебался от 2,04 до 1,56 м в 2001 году, а в 2002 году от 1,65 до 1,75 м.

Минимальные и максимальные УГВ на полях под посевами хлопчатника и пшеницы объясняются их расположением относительно дрен и Среднетепинского коллектора: на картах расположенных вблизи дрен, уровень на 0,25-0,4 ниже, чем в междреньях.

Бороздковые поливы сельхозкультур сильно влияют на изменение режима грунтовых вод, поднимая их уровень на следующий день после его начала, а иногда в тот же день. При этом величина подъема УГВ после полива изменяется в зависимости от нормы полива от 0,79 до 0,89 м.

Время подъема УГВ на хлопковом поле №13, расположенном вблизи дрены УД-2 изменяется от 2 до 5 дней, а спада до исходной величины - от 5 до 11 дней, т.е. скорость сработки в 2 раза меньше, чем скорость подъема. На полях, расположенных в средине междренья, время запаздывания сработки еще больше, т.е. процесс сработки протекает медленнее. Интенсивность неравномерности и ее сглаживание зависит от нормы и частоты поливов, а также от расположения полей относительно дрен. На картах вблизи дрен она больше, чем в междреньях, как это проявляется на картах К-5 и К-13, которые находятся под влиянием дрены УД-3.

Неравномерность уровня грунтовых вод и влагозапасов после полива больше всего проявляется на хлопковых полях, нежели, чем на зерновых, что связано с различными нормами и сроками проведения поливов. Поливные нормы хлопчатника в среднем на 15-20 % больше, чем зерновых и колеблются в пределах 1100-1470 $м^3$/га (в 2002 году более 2000 $м^3$/га). Из 9 полей зерновых за 2002 г. только поля № 1 и № 11 засеяны повторной культурой – кукурузой на силос. В целом в междреньи наблюдается достаточно сложная картина взаимодействия инфильтрующихся оросительных вод с подземным притоком и работой дренажа. На рисунках 4 и 5 показано, что эта динамика определяется степенью покрытия поливами всего междренья и продолжительностью полива.

Колебания объема, заключенного в «бугре» грунтовых вод и уровня грунтовых вод принимает максимальное значение в июле-августе, когда поливы нарастают постоянно и доля «покрытия» ими междренья (IAC[27]) увеличивается от 0,25 до 0,45 в среднем, достигая максимума в начале ав-

[27] IAC - коэффициент «покрытия», в разрезе суток, орошаемой площади поливами.

густа – 0,8 и затем в октябре снижается до 0,4, но с длительностью более полумесяца. Поскольку основной причиной резкого подъема УГВ является инфильтрационное питание, формируемое в период проведения промывок и вегетационных поливов, то мерами снижения неравномерности влагозапасов в почвогрунте должно быть управление глубинной инфильтрацией на полях, что достигается правильными подборами элементов техники полива и, главным образом, контролем поливных норм.

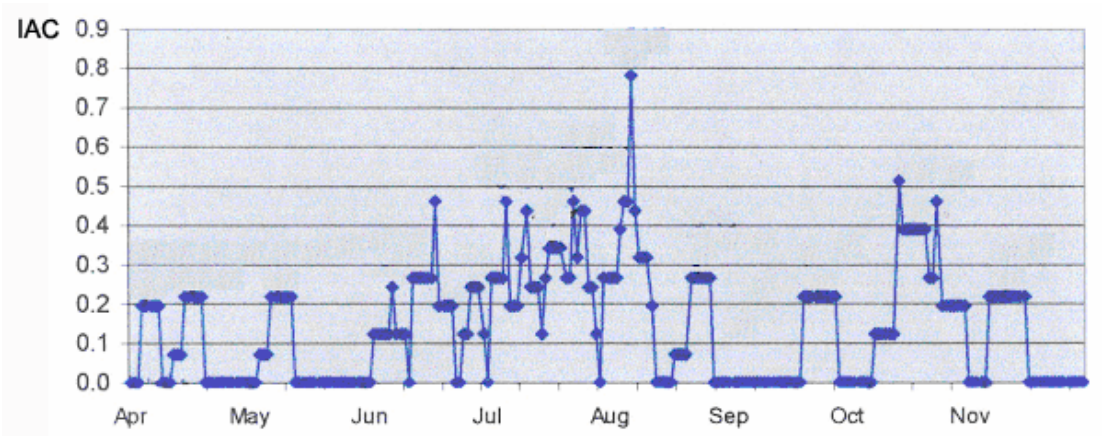


Рис. 4. Суточная динамика коэффициента «покрытия» орошаемой площади поливами (IAC) для участка дренируемого дреной - УД-3 (2001)

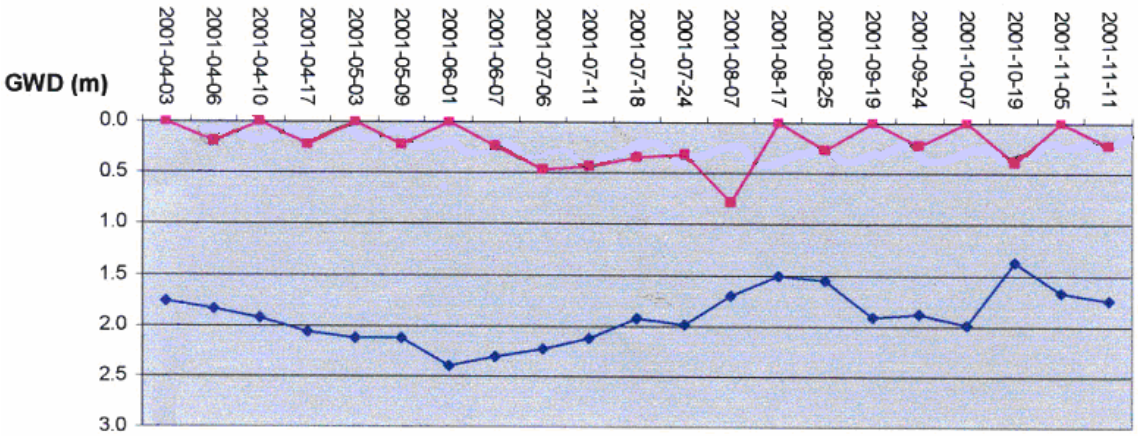


Рис. 5. Динамика глубины залегания грунтовых вод (GWD) и коэффициента «покрытия» орошаемой площади поливами(IAC) для участка дренируемого дреной - УД-3 (2001)

Однако при существующих в Центральной Азии способах орошения и техники полива подобного оптимального контроля достичь практически невозможно. «Бугор» грунтовых вод образуется во время поливов в течение вегетационного периода. Этот медленный подъем грунтовых вод определяется долей инфильтрационного питания, которая не была сработана. Чем больше площадь, «покрытая» поливом, тем выше уровень грунтовых вод вследствие несработанной дренажом доли инфильтрации.

Растекание бугра грунтовых вод происходит под влиянием взаимодействия интенсивности полива, мощности дренажа и оттока за пределы поливных участков. При этом сработка доли объема, заключенного в «бугре» грунтовых вод, создает дополнительную нагрузку на дренаж, так как мощность дренажа рассчитывается, исходя из отвода им среднегодового инфильтрационного питания. В связи с этим, для управления инфильтрационным питанием с учетом «бугра», образуемого после каждого полива необходимо выяснить расходование поданной поливной нормы на суммарное испарение, на капиллярный сброс в грунтовые воды, ее сработку дренажем и отток в сторону неполиваемых в данный момент участков (растекание «бугра»).

Подобное расчленение поливных норм на вышеперечисленные элементы, входящие в состав водного баланса зоны аэрации (табл. 4), показывает, что:

- суммарное испарение составляет от 34 до 39 % от нормы полива;
- увеличение запасов влаги корнеобитаемого слоя составляет от 36 до 46 %;
- капиллярный сброс в грунтовые воды и растекание «бугра» грунтовых вод - от 9 до 25 %;
- от 2-4 до 12 % срабатывается дренажем, как дополнительная нагрузка, сверх мощности дренажа.

На основе проведенных наблюдений получена зависимость дренажного модуля от степени одновременности полива в междреньи (рис. 4, 5). Одновременное орошение на более чем 50 % площади междренья увеличивает кратковременно дренажный модуль вдвое, а когда вода одновременно подается на меньше чем 20 % площади уменьшает модуль на 30-40 % от расчетного. Этот анализ показывает, что формирование «бугра» грунтовых вод оказывает небольшое влияние на объем дренажного стока, но кратковременно дренажный модуль может вдвое превысить рассчитанную по средним показателям величину. Это особенно проявляется в процессе промывок, что должно учитываться при проектировании дренажа и одновременно при определении оптимального режима поливов.

Таблица 4. Результаты расчета расходования воды, поданной на поле

Номер полива		УГВ, м			Расчетные параметры			W_r	W_{kk}	Водо-отдача μ	Подъем УГВ h*
		до полива	после полива	Изм.	ET+ΔET	Q+Δq	H_{fsd}				
1.	1	2,55	1,82	0,73	492	52	1,15	518	349	0,048	
2-7.06	2	2,48	1,8	0,68	(35%)	(4%)	1,08	(36%)	(25%)	0,05	
m=1411	3	2,54	1,7	0,89			1,19				
(100%)				0,77			1,14			0,05	0,70
2.	1	2,59	1,89	0,7	430	28	1,19	658	311	0,044	
23-30.06	2	2,,5	1,78	0,73	(30%)	(2%)	1,10	(46%)	(22%)	0,043	
m=1427	3	2,48	2,07	0,41			1,08			0,076	
(100%)				0,61			1,12			0,054	0,60
4.	1	2,17	1,95	0,22	455,4	132,6	0,77	470	106	0,048	
25-29.07	2	2,15	1,94	0,21	(39%)	(12%)	0,75	(40%)	(9%)	0,050	
m=1164	3	2,11	1,88	0,23			0,71			0,046	
(100%)				0,22						0,048	0,22
5.	1	2,16	1,84	0,32	376	106	0,76	430	210	0,06	
7-11.08	2	2,12	1,81	0,32	(34%)	(9%)	0,72	(38%)	(19%)	0,068	
m=1122	3	2,11	1,65	0,46			0,71			0,046	
(100%)				0,36						0,06	0,35

Примечание: Расчеты для 3-го полива не приводятся.
1., 2., 4., 5.: номер полива; следующая строка после номера полива: срок полива (ДД/ММ); m: поливная норма, м^3/га; 100%: % от поливной нормы; ET: среднедекадное суммарное испарение, мм; ΔET: превышение суммарного испарения в дни проведения полива над его среднедекадной величиной, м^3/га; Q: среднедекадный дренажный модуль за вычетом подземного притока, м^3/га; Δq: увеличение дренажного модуля за счет капиллярного сброса, м^3/га; H_{fsd}: глубина свободной поверхности, т.е. расстояние между УГВ и поверхностью почвы, м; W_r: пополнение влаги в зоне аэрации до ППВ; W_{kk}: капиллярный сброс в грунтовые воды; μ: доля единицы

$$* \; h = \frac{W_{kk}}{\mu \cdot 10^3}$$

Выводы

При оценке взаимодействия орошения и дренажа, определяемого выбором мелиоративного режима и его параметров, следует учитывать, что как оросительный модуль и его инфильтрационная доля, так и, особенно, соотношение высоты капиллярного поднятия и глубин заложения дрен определяют суммарные затраты воды на орошение и дренаж. Оптимальный мелиоративный режим в связи с этим должен находиться с учетом этих всех параметров и элементов водно-солевого баланса, особо минерализации грунтовых и оросительных вод.

Второй очень важной особенностью сочетания поверхностного полива и различных видов дренажа является неравномерность инфильтрации по

орошаемой площади, зависящая как от параметров техники полива (Хорст и др., 2005), интенсивности одновременных поливов в междренье - коэффициента инфильтрационного питания по площади, так и от формирования «бугра» грунтовых вод под влиянием депрессионных кривых.

Тем не менее, хотя возникновение этих «бугров» и увеличивает потребное значение расчетного дренажного модуля, в то же время создает определенный запас в интенсивности дренажного оттока за счет растекания до 25 % объема фильтрационного «бугра».

Библиография

Духовный, В.А., 1983. Ирригационные комплексы на новых землях Средней Азии. Ташкент, изд-во «Узбекистан», 184 с.

Духовный, В.А., 1984. Водохозяйственный комплекс в зоне орошения, формирование и развитие. Москва, Колос, 254 с.

Духовный, В.А., Баклушин, М.Б., и др., 1979. Горизонтальный дренаж орошаемых земель. Москва: Колос, 254 с.

Horst, M.G., Shamutalov, Sh.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: p.210-231.

Решеткина, Н.М., 1965. Мелиоративные режимы. «Гидротехника и мелиорация».

Решеткина, Н.М., Якубов, Х.И,. 1978. Вертикальный дренаж. Москва, Колос, 320 с.

Стулина, Г.В., Камейра, М.Р., Перейра, Л.С.,. 2005. Калибровка модели RZWQM и поиск альтернативных решений для совершенствования методов орошения и выращивания сельскохозяйственных культур (в этой книге).

Якубов, Х.И., Икрамов, Р.К.,. 1983. К вопросу оптимизации управления мелиоративным режимом почв в аридной зоне. Труды САНИИРИ – Ташкент, Вып.168 , стр.2-17

Якубов, Х.И.,. 1990. Мелиорация засоленных земель на фоне вертикального дренажа – Ташкент, «Мехнат», 187 стр.

Умаров, П.Д., Тучин, А.И.,. 2003. Элементы моделирования системы дренажа. В материалах Международной научно-практической конференции по экологической устойчивости и передовым подходам к управлению водными ресурсами в бассейне Аральского моря – Алматы.

Часть 5

ИНСТРУМЕНТЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Глава 17.

РАБОТА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В.А. Духовный[28], А.И. Тучин[28]

Реферат: В данной работе дается оценка существующего распределения воды в оросительной системе, пути совершенствования этих подходов определяются на основе имитационного моделирования. Рассматриваются математические методы распределения водных ресурсов в орошаемом земледелии, с учетом технического состояния ирригационных систем, структуры посевных площадей и выбранной техники полива. Приводится решение задачи о распределении потерь воды в канале при произвольном размещении орошаемых площадей вдоль его длины. Выполняется формализация ирригационной системы в виде ориентированного графа на многосвязной сети, и формулируется ряд оптимизационных задач, возникающих на различных этапах процесса распределения воды. Рассматриваются виды неопределенности, присущие этим процессам и исследуются различные критерии, допускающие количественную оценку сравнения разных вариантов водораспределения. Формулируется задача оптимального управления, обеспечивающая увязку графиков поливов сельскохозяйственных культур с реально складывающейся водохозяйственной обстановкой. Приводится решение этих задач на примере опытного хозяйства «Азибек-1», Ахунбабаевского района, Ферганской области.

Ключевые слова: оросительная система, регулирование воды в каналах, эксплуатация каналов и управление каналами, распределение воды, оптимизация.

[28] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, г. Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11. dukh@icwc-aral.uz

Введение

Даже в условиях крупных орошаемых хозяйств советского периода (колхозов и совхозов) с их крупными (8-15 га) полями и бригадными севооборотными участками (50-150 га), подача воды водопользователям и увязка распределения воды с потребностью сельхозкультур представляла из себя достаточно сложную задачу. Но она, в основном, решалась путем подачи постоянного тока воды бригадам (или строго определенного водооборота между ними), а бригады сами распределяли воду между полями, устанавливая определенную очередность при выполнении обязательного условия – отсутствия сбросов. Ответственность за равномерность водораспределения внутри бригадных участков возлагалась на бригадиров, и внешне данный процесс представлял, как бы, «ноу-хау» умения бригадиров равномерно и эффективно распределять оросительную воду.

Ныне в условиях перехода к рыночным реформам задача намного усложнилась по целому ряду причин. Требования отдельных фермерских полей к системе водоподачи стали намного выше – фермер хочет получать воду тогда, когда этого требуют растения, т.е. как можно в большей степени соответствуя графику водопотребления. Учитывая разницу в почвенных условиях полей и требованиях различных сельхозкультур на орошение, а отсюда и сдвижку в требуемых сроках поливов, можно определить так называемую неукомплектованную потребность в оросительной воде по каналу – распределителю последнего порядка. Затем нужно увязать ее с возможностью подачи воды по ступеням иерархии ирригационной сети сверху вниз и тем порядком водоподачи, который установлен в той или иной оросительной системе. Таким образом, задача планирования водоподачи и водораспределения на нижней ступени (до поля) оросительной сети разбивается на следующие:

1. Определение потребности в воде отдельных полей подкомандных каналам на основе требований на воду/водопотребление сельхозкультур, смоделированных моделью SEDAM и моделями ISAREG – SADREG (как представлено в работах Гонсалвес *и др.,* 2005a, 2005b; Фортес *и др.,* 2005)
2. Получение информации о планируемой и ожидаемой водоподаче по каналу или порядку водораспределения, который намечен Ассоциацией водопользователей или другим органом (райводхозом), которая также может быть входной информацией для модели SEDAM
3. Установление возможных сдвижек относительно средних сроков поливов без ущерба сельхозкультурам (± n-ое количество дней) с целью «укомплектования» графика водопользования, т. е. максимального совмещения «потребности в водных ресурсах» с минимумом потерь продуктивности земельно-водных ресурсов и минимизацией холостых сбросов, что также может быть оптимизировано с помощью SEDAM или

другого математического моделирования, вместо ранее использовавшихся рутинных методов расчета.

Следует отметить, что на практике используются и другие методы, когда подача воды идет не по потребности, а диктуется сверху (АВП или водохозяйственной организацией) путем установления жесткой очередности водооборота по объему или времени или на основе пропорционального вододеления, когда фермеры должны сами приспосабливаться к системе водоподачи, а не предъявлять требования к ней. Такая система, например, давно существует в Индии, Пакистане («варабанди», «шейхджейли»), но, очевидно, что она вызывает большие осложнения для хозяйств. Более целесообразно организовать порядок распределения воды, который в большей степени будет ближе к потребности сельхозкультур, полей, хозяйств. Этой задаче и посвящена данная работа, цель которой выработка с помощью моделирования подходов к осуществлению предлагаемого нами порядка водопользования.

При этом, отмечая преимущества модели SEDAM по определению плана водопользования, здесь предложен принцип моделирования, который позволяет оптимально увязать водопользование с параметрами поля и ограничениями вышележащих источников воды. В последующем желательно комбинирование обоих подходов.

Управление водораспределением

Характеристика ирригационной системы

Ирригационная система представляет собой комплекс гидротехнических сооружений, организованных в виде ориентированной сети, и предназначенной для подачи требуемого объема водных ресурсов в заданные точки пространства и временные этапы с целью орошения сельскохозяйственных угодий. Роль проводников водных ресурсов выполняют системы каналов, как правило, различных конструкций, а роль управляющих регуляторов расхода - комплекс гидротехнических сооружений (затворов, водосливов и т. п.). Требуемые объемы водных ресурсов и временные промежутки водоподачи определяются с учетом орошаемых площадей и структурой посевов на них сельскохозяйственных культур. Технические характеристики оросительных систем обычно выражаются значениями максимальных расходов, протяженностью оросительной сети и коэффициентами полезного действия (КПД) системы каналов.

Основными эксплуатационными характеристиками функционирования ирригационной системы, в порядке их приоритетов, являются:

1. степень водообеспеченности орошаемых площадей
2. равномерность обеспеченности водой водопотребителей

3. относительный объем потерь водных ресурсов в системе
4. относительная амплитуда колебаний расхода в каналах.

Первые три характеристики отражают роль ирригационной системы в гидромелиоративном комплексе, а четвертая – эксплуатационную нагрузку на систему.

Рассматривая ирригационную систему как объект управления, каждую из этих выше перечисленных характеристик, можно трансформировать в собственные (частные) критерии, отражающие определенный аспект в ее функционировании. Поскольку использование различных критериев будет приводить к разным вариантам распределения водных ресурсов, то задача управления ирригационной системой, относится к многокритериальному анализу, как принимается в СППР SEDAM (Гонсалвес *и др.,* 2005b), где неопределенность цели требует введения дополнительных экспертных оценок значимости той или иной характеристики.

Неопределенность цели не единственный вид неопределенности в управлении ирригационной системой. Стохастическая природа гидрологического стока, образующего доступные объемы водных ресурсов, и климатические условия, на фоне которых формируются конкретные требования водопользователей, обусловливают следующий вид неопределенности. Этот вид неопределенности, обычно называемый «природной неопределенностью», не позволяет заранее определить единственное решение и требует поиска некоторой стратегии управления распределением водных ресурсов, как функции от поступающего объема стока и текущих климатических условий.

Однако существуют и другие виды «антропогенной неопределенности», которые требуют также корректного описания сложившихся отношений между различными участниками оросительной системы. Эта математически четкая формализация существующих правил по распределению водных ресурсов между участниками позволит усовершенствовать их и подчинить определенным положениям, снижая эту еще одну разновидность неопределенности. В этих условиях разработчик математической модели сталкивается с неизбежной проблемой выбора между упрощением модели с потерей точности, или наоборот, с большей ее детализацией. В первом случае, сознательно допускается определенное искажение физических и технических элементов системы, с тем, что бы при выполнении идентификации параметров, в неявном виде получить одновременно и сложившиеся взаимоотношения между участниками. Второй путь опирается на более детальное описание физических процессов и технологических элементов системы, с тем, чтобы идентификацию параметров выполнить по косвенным оценкам или даже по другим аналогичным системам. Неизвестные отношения в этом случае не участвуют в идентификации параметров и определяются на втором этапе уточнения отношений или правил по распределению водных ресурсов,

сложившихся в системе на рассматриваемый момент времени. Несмотря на большую трудоемкость второго пути, результаты, полученные на таких моделях, не только дают возможность управлять системой в более широком диапазоне изменения внешних условий, но и позволяют выявить отдельные социально-экономические последствия, имеющие самостоятельную ценность.

Формальное описание ирригационной системы

Формальное описание распределения водных ресурсов между элементами ирригационной системы – каналами, отводами и контурами орошения – опирается на законы сохранения массы воды, для каждого рассматриваемого интервала времени. В гидродинамике для этого метода используется термин «квазистационарное приближение», которое допустимо, если время релаксации процессов движения воды в системе значительно меньше интервала осреднения по времени. Для каналов первого и второго порядка, время выхода на стационарный режим не превышает двух–трех часов, следовательно, в моделях с интервалами осреднения «сутки», «декада» подобное приближение вполне приемлемо. Для более низких уровней иерархии каналов стохастичность оперативных изменений в режимах подачи воды крайне велика, если не подчинить их определенным правилам. Фактическое состояние дел с колебаниями расходов в каналах третьего и более низких порядков хорошо видно из представленного на рис. 1 графика первоначального режима работы канала С-1.

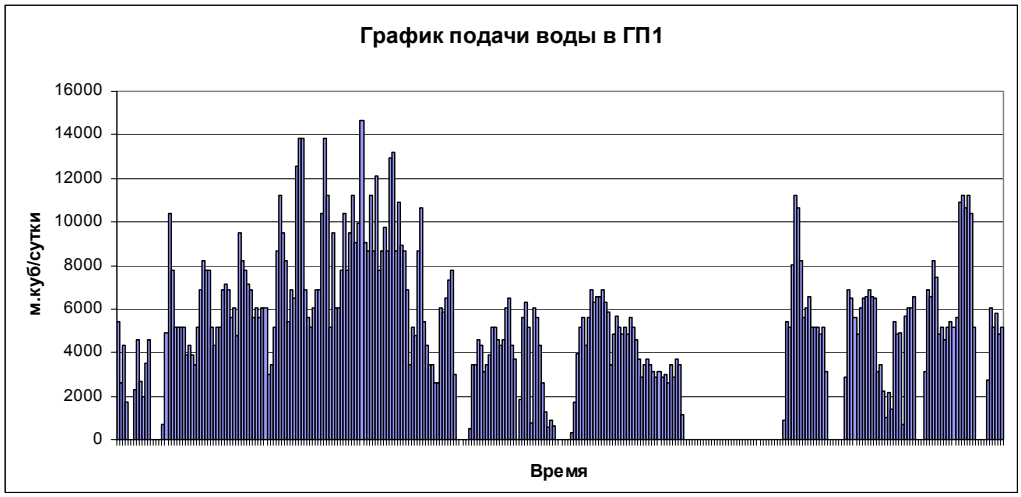


Рис. 1. Фактический режим подачи воды в голове канала С-1, хозяйство «Азизбек-1» Ферганской области

Формулировку задач планирования и оптимального управления подачей водных ресурсов на орошение ирригационной системой начнем с

рассмотрения некоторой территории, ограниченной контуром $\partial \boldsymbol{g}$, определяющим контур орошения, внутри которой имеется множество {J} площадей орошения. На каждой площади возделывается некоторое множество культур $\{R_j\}$, с параметрами:

$$F_{r,j},\ q^{N}_{r,j}(t),\ n_j,\ j\in\{J\},\ r\in\{R_j\},\ t\in\{T\},$$

где: $F_{r,j}$ - площадь, занимаемая культурой “r” на площади “j” , $q^{N}_{r,j}(t)$ - функция удельного водопотребления воды культурой “r”, с учетом всех агротехнических и климатических факторов, а η_j- полный к.п.д. j-ой площади орошения, соответственно. {T} – период времени управления. Данная территория покрыта множеством оросительных каналов, забирающих воду из нескольких источников, причем часть воды пропускается транзитом.

Определим ориентированную сеть в виде **g**(K,C), где K = {0,1, . . .,k} - множество узлов, соответствующих гидротехническим сооружениям, а C = {0,1, . . .,c} - множество дуг, идентифицирующих каналы. Каждый элемент c $\in$ C, характеризуется парой (k,i), такой что ($\forall$(k,i), k$\in$K, i$\in$K, i$\neq$k), где: “k” – начальный узел, а “i” - конечный узел, рассматриваемого канала “c”. Каждый канал характеризуется длиной “L_c” ($L_c \geq x \geq 0$), коэффициентом полезного действия “η_c” и значением максимальной пропускной способности “q_c^{max} “. Далее, для каждого канала “c”, c$\in${C}, введем множество отводов $\{P_c\}$, характеризуемых тройкой параметров (p,x,j) , p$\in${Pc}, а j$\in${J}, “j” – площадь орошения обслуживаемая отводом “p”, а “x” – координата этого отвода на канале “c”.

Множество отводов связывают сеть каналов с площадями орошения, таким образом, что из одного отвода вода подается в строго определенную площадь орошения, но одна площадь орошения может обслуживаться несколькими отводами. Множество $\{P\}=\cup_c \{P_c\}$, кроме этого $\{P_c\} \cap \{P_k\} = \varnothing$, $\forall$(c,k), c$\in${C}, k$\in${C}, c$\neq$k; Таким образом, множество {P} можно рассматривать в виде множества дуг второго уровня на расширенном ориентированном графе **G**(K,C,P,J), – который в дальнейшем будем называть «графом орошаемой территории».

Рассмотрим одиночный канал с параметрами “L” – длина канала, “η” - коэффициент полезного действия (к.п.д.) канала, который обеспечивает водой множество отводов и транзит. Обозначим через q(x,t) – расход в канале на расстоянии “x” от его начала, в момент времени “t”, а через $q_p(x,t)$ – расход в отводе “p” расположенном на этом же расстоянии. Естественно, что должно выполнятся неравенство:

$$q^{max} \geq q(x,t) \geq q_p(x,t),\ \forall L \geq x \geq 0,\ t \in \{T\}; \qquad [1]$$

Расходы в голове и конце канала в этом интервале времени будут: $q\ (0,t)$ и $q\ (L,t)$ соответственно. Рассматривая “η” в качестве основной

характеристики потерь воды из канала вдоль пути *“x”,* запишем уравнение для переменного расхода:

$$\frac{dq}{dx} = -\lambda \times q\,; \quad \text{при } L \geq x \geq 0,\ \lambda > 0; \qquad [2]$$

где: λ - интенсивность потери расхода вдоль канала, которую еще необходимо определить.

Рассматривая λ, в качестве постоянной для данного канала и интегрируя уравнение [2] с учетом условий на концах интервала:

$$Q(0,t) = q(0,\ t) \text{ и } q(L,t) = \eta \times q(0,t); \qquad [3]$$

получим уравнение расхода в канале для произвольного сечения на расстоянии “*x*” от головы канала:

$$q(x,\ t) = q(0,\ t) \times \boldsymbol{exp}\left(\frac{x}{L}\ln\eta\right);\ L, \geq x \geq 0; \qquad [4]$$

Из уравнения [4] находим связь между расходами в сечениях x_1 и x_2:

$$q(x_2,\ t) = q(x_1,\ t) \times \boldsymbol{exp}\left(\frac{x_2 - x_1}{L}\ln\eta\right);\ L \geq x_2 \geq x_1 \geq 0; \qquad [5]$$

Расход в голове канала, пользуясь выражениями [4] и [5], найдем при произвольном количестве потребителей {P} вдоль его длины:

$$q(0,\ t) = q(L,\ t)/\eta + \sum_{p\in\{P\}}[\,q_p(x,\ t) \times \boldsymbol{exp}\left(-\frac{x_p}{L}\ln\eta\right)]; \qquad [6]$$

где $q_p(x,t)$- расход в “p” – й контур орошения в момент времени “t”, а $q(L,t)$- транзитный расход в конце канала.

Учитывая свойства “exp” и “ln”, формулу [6] можно записать в виде:

$$q(0,\ t) = q(L,\ t)\,/\eta + \sum_{p\in\{P\}}[\,q_p(t) \times \eta^{-\left(\frac{x_p}{L}\right)}\,]; \qquad [6a]$$

Интересно отметить, что выражения [6], [6а] дают правильные значения для расхода в голове канала и при наличии постоянного бокового притока (в этом случае $\eta > 1$).

Задача планирования распределения воды

3 Задача планирования распределения оросительной воды возникает на этапах согласования требований на воду, исходя из состава площадей, засеянных сельскохозяйственными культурами, доступного объема воды и технического состояния каналов в ирригационной системе. Эта задача формулируется следующим образом: каждая площадь орошения из множества {J}, формирует требования на подачу водных ресурсов:

$$q^*_j(t) = \sum_{r\in\{R\}} F_{j,r} \times q^{\mathrm{N}}_{\mathrm{r,j}}(t)/\eta_j,\ \forall\, j \in \{\mathrm{J}\},\ t \in \{\mathrm{T}\} \qquad [7]$$

где: $F_{j,r}$ - площадь, занятая культурой “r” в контуре орошения “j”, $q^N_{r,j}(t)$ - норма водоподачи для культуры “r”, в контуре орошения “j”, η_j - к.п.д. техники орошения в контуре “j”.

Эти требования обеспечиваются работой отводов:

$$q^*_j(t) \geq q_j(t) = \sum_{c\in\{C\}} \sum_{p\in\{P_c\}} q_{p,j}(t),\ \forall\, j \in \{\mathrm{J}\},\ t \in \{\mathrm{T}\} \qquad [8]$$

Кроме этого заданы требования к транзиту:

$$q^*_c(L,t),\ \forall\, c \in \{\mathrm{out}\} \subset \{\mathrm{C}\},\ t \in \{\mathrm{T}\} \qquad [9]$$

и доступный гидрограф подачи водных ресурсов в систему:

$$q^*_c(t) \geq q_c(0,t),\ \forall\, c \in \{\mathrm{inp}\} \subset \{\mathrm{C}\},\ t \in \{\mathrm{T}\} \qquad [10]$$

здесь: {inp} и {out} – источники (притоки) и стоки (оттоки) ирригационной системы, соответственно.

Выполняются уравнения сохранения массы воды в каналах:

$$q_c^{max} \geq q_c(0,t) = q_c(L,t)/\eta_c + \sum_{p\in\{P_c\}} [\, q_p(x,t) \times \boldsymbol{exp}\,(-\frac{x}{L_c}\ln\eta_c)]; \qquad [11]$$

Выполняются уравнения сохранения массы воды в узлах системы:

$$\sum_{c\in C_k^+} q_c(L,t) - \sum_{c\in C_k^-} q_c(0,t) = 0;\ \forall\, \mathrm{k} \in \{\mathrm{K}\},\ \mathrm{t} \in \{\mathrm{T}\} \qquad [12]$$

где: C_k^+ - множество каналов входящих в узел “k”, C_k^- - множество каналов выходящих из узла “k”, ($C_k^+ \subset \{C\}$; $C_k^- \subset \{C\}$).

Для задач планирования вводится временная сетка с шагом в одну декаду, {T}={0, 1, . . . ,t }. В качестве неизвестных рассматриваются $q_c(0,t)$, $q_c(L, t)$ и $q_{p,j}(t)$, $\forall$ t$\in${T}. Далее задача распадается на две:

- Задача (A) – определить гидрографы подачи водных ресурсов в голове ирригационной системы, обеспечивающие требования орошаемых площадей и транзита, и удовлетворяющие техническим характеристикам каналов, в этой задаче $q^*_c(t) \sim \infty$, $\forall\ c \in$ {inp}
- Задача (B) – распределить доступные объемы водных ресурсов подаваемые к голове ирригационной системы q*c(t), между орошаемыми площадями и транзитом, и удовлетворяющие техническим характеристикам каналов.

Задача (A) имеет тривиальное решение только для очень простых ирригационных систем (одна голова, древовидная структура сети каналов), которые можно рассматривать лишь как «исключение из правила». В общем случае для получения единственного решения необходимо сформировать критерий, позволяющий оценивать качество наших действий. Простейшую целевую функцию, удовлетворяющую условиям сохранения массы и выделяющую единственное решение, для задачи (A), можно записать в виде:

$$f(q(t)) \Rightarrow \frac{\max}{q(t)} \left(\frac{\sum_{j\in\{J\}} q_j(t)}{\sum_{c\in\{inp\}} \lambda_c \times q_c(0,t)} \right),\ \forall\ t\in\{T\} \qquad [13]$$

где: $q_j(t)$ – вычисляется согласно выражению [8], а $\lambda_c \geq 1$ – коэффициенты, учитывающие неравноценность воды, подаваемой из разных источников, например: один источник является самотечным водозабором на реке, а второй насосной станцией. В случае одинаковых источников все λ_c имеют значения равные единице.

Возникновение дефицита в системе (строгое выполнение неравенства в выражении [8]), при решении задачи (A), означает, что часть каналов функционируют с предельной нагрузкой (т. е. каналы, для которых выполняется равенство в выражении [11]).

На втором этапе (задача (B)) необходимо распределить доступные объемы водных ресурсов некоторым наилучшим способом. В этой задаче на первое место выдвигается «принцип справедливости», заключающийся в равнозначной урезке всех орошаемых контуров. Относительная величина урезки определяется через требуемый и доступный расходы в виде:

$$\beta(t) = \frac{\sum_{c\in\{inp\}} q_c^*(t)}{\sum_{c\in\{inp\}} q_c(0,t)}, \ \beta(t) \le 1, \ \forall\ t\in\{T\} \qquad [14]$$

где: $q_c(0,t)$ - результат решения задачи (А), $q^*_c(t)$ - выделенные водные ресурсы.

Вычислим доступные объемы для орошаемых контуров:

$$\tilde{q}_j(t) = q^*_j(t) \times \beta_j(t), \ \forall\ j\in\{J\}, t\in\{T\} \qquad [15]$$

и введем новую переменную $\delta q_j(t)$:

$$\delta q_j(t) = [\tilde{q}_j(t) - q_j(t)]/F_j \ge 0, \ \forall\ j\in\{J\}, t\in\{T\} \qquad [16]$$

где: F_j – площадь орошаемого контура “j”. Рассматривая $\delta q_j(t)$ как меру отклонения от наилучшего распределения воды, получим выражение для целевой функции задачи (В):

$$f(q(t)) \Rightarrow \frac{\min}{q(t)} [\sum_{j\in\{J\}} \delta q_j(t)], \ \forall\ t\in\{T\} \qquad [17]$$

Задача оптимального управления

Применение методов теории управления в задачах распределения водных ресурсов начинается с формулировки трех ключевых понятий - определения цели, формализации траектории системы и допустимого пространства управления. В задачах предыдущего раздела формулировалась цель распределения водных ресурсов, для достижения которой, на каждом временном интервале, осуществлялся поиск некоторого наилучшего решения, исходя из требований, доступных объемов воды и технического состояния каналов в конкретный интервал времени. Таким образом, часть элементов как «цель» и «допустимое пространство управления» существовали в предыдущих задачах (последний элемент, в неявном виде через различные ограничения). В задачах управления сами требования, как впрочем, и доступный объем воды, становятся функциями не только внешних условий, но решений принятых на предыдущих интервалах времени. Это влияние проявляется через элемент «траектория системы». В нашем случае, элемент «траектория системы», формирует контур орошения. Для задач планирования, с периодом управления в сезон и интервалом осреднения в десять суток, такое усложнение не имело смысла, из-за высокой неопределенности климатических условий и гидрологического стока. Совершенно иначе обстоит дело, когда

рассматриваются периоды управления порядка одного месяца или декады с интервалами осреднения сутки и менее. В этом случае подача воды в контур орошения формируется условиями полива конкретных сельскохозяйственных культур. Контур орошения, с точки зрения оросительной системы, представляет собой конечного потребителя. Основными эксплуатационными характеристиками контура орошения являются:

а) График полива сельскохозяйственных культур

б) Объем холостых сбросов в коллекторно-дренажную сеть.

Эти характеристики определяются внутриконтурно и зависят от множества параметров, таких как, вид сельскохозяйственной культуры, уклоны оросительных полей, типы почв, текущие климатические условия и т.д. Для ирригационной системы, основной характеристикой является характеристика - «а», нарушение которой, имеет двухпараметрический отклик. Сжатие или растяжение графика полива увеличивает объемы холостых сбросов, (сжатие – ведет к увеличению поверхностных холостых сбросов, растяжение – к увеличению фильтрационных потерь). Смещение этого графика относительно начального момента времени подачи воды приводит, либо к переувлажнению почвы (ранняя подача воды), либо, при задержке полива, к потере продуктивности сельскохозяйственной культуры. Поскольку на каждый канал ирригационной системы, подвешено несколько контуров орошения, то на внутридекадном уровне управления перед ирригационной системой стоит уже другая задача, а именно – задача перераспределения водных ресурсов между контурами орошения некоторым, наилучшем образом. Эта задача, в отличие от предыдущих задач, имеет более низкий иерархический уровень, но все еще относится непосредственно к оросительной системе, поскольку именно она определяет фактический режим подачи воды на орошение сельскохозяйственных культур и амплитуды колебаний расходов на участках каналов.

Для решения этой задачи, обычно именуемой «задачей комплектации графика поливов», рассмотрим функционирование контура орошения, засеянного набором сельскохозяйственных культур. Требования каждой сельскохозяйственной культуры определяются на базе программного комплекса ISAREG, которые выражаются в виде серии поливов со значениями даты начала полива и объема воды, требуемого для каждого полива. При установлении расхода (оптимального для данного типа полей, характеристик почв и т.д.) для каждой сельхозкультуры, любое отклонение от него приводит к увеличению эксплуатационных потерь воды. Пример изменений потерь воды вследствие отклонений от фиксированного расхода воды приведен на рис. 2[29], который показывает разные потери при увеличении и уменьшении расхода (две различные ветви). Так при увеличении расхода на 0,4 л/с (q = 2,5 л/с) потери увеличиваются почти

[29] График построен по материалам исследований САНИИРИ

вдвое, при уменьшении на ту же величину расхода – потери увеличиваются лишь на 10 %. Исходя из условий техники орошения, для каждой культуры и каждого поля определяется некоторый оптимальный для данного типа полей, состава почв и т. д., расход, отклонения от которого приводят к увеличению потерь воды. При этом оптимальном расходе обеспечиваются минимальные потери в поле (в данном случае 15 %), которые резко увеличиваются при больших или меньших расходах на поле (рис. 2). Как видно из рисунка 2, имеет место неравнозначность потерь при увеличении и уменьшении расхода (две различные ветви). Кривые такого типа требуют привлечения кубических (или более высокого порядка) полиномов, однако при небольших отклонениях можно пользоваться квадратичной аппроксимацией.

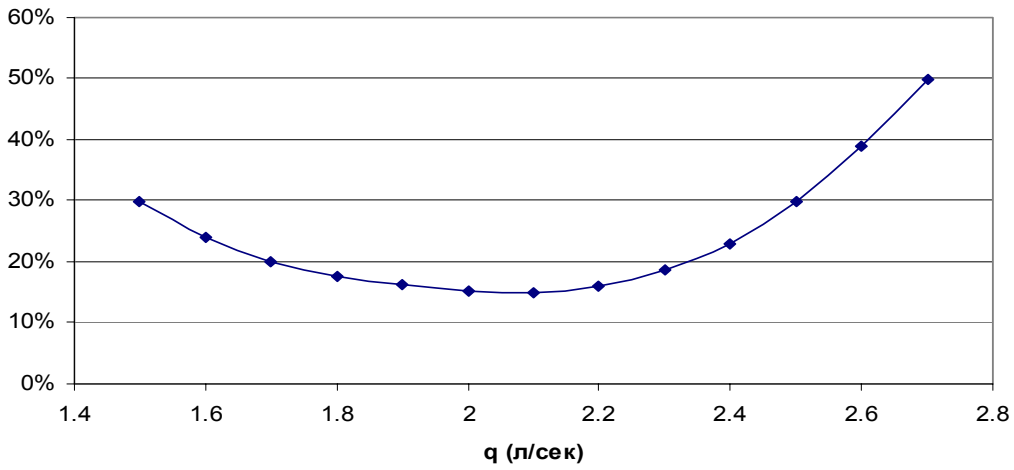


Рис. 2. Потери воды в зависимости от расхода, подаваемого в борозду

Именно в этом приближении опишем динамику одного полива сельскохозяйственной культуры:

$$F_{r,j} w^n_{r,j} = \int_{t \in T^r_n} q_{r,j}(t) \times [\eta_{r,j} - \alpha_{r,j}(q_{r,j}(t) - q^0{}_{r,j}(t))^2] dt \qquad [18]$$

где: "j" – индекс контура орошения, “r” –индекс культуры, “n” – номер полива, $F_{r,j}$ – площадь, занятая культурой , $w^n{}_{r,j}$ - объем воды, требуемый культурой в период полива “n”, $\eta_{r,j}$ – к.п.д. техники орошения, $\alpha_{r,j}$ - коэффициент увеличения потерь при уклонении фактического расхода от установленного техникой орошения, $q^0_{r,j}$ - установленный расход для определенного интервала времени, $q_{r,j}$ - фактический расход, подаваемый в этот интервал времени, T^r_n – период выполнения полива “n”.

Уравнение [18] определяет требования со стороны сельскохозяйственных культур, где неизвестными являются: T^r_n, $n=\{0,1,.,N^r\}$ - количество поливов культуры “r” и $q_{r,j}(t) \geq 0$. В соответствии с [18]

трансформируется и уравнение [8]:

$$\sum_{r\in\{R^j\}} q_{r,j}(t) = \sum_{c\in\{C\}} \sum_{p\in\{P_c\}} q_{p,j}(t),\ \forall\, j \in \{\mathrm{J}\},\ t \in \{\mathrm{T}\} \qquad [19]$$

где: $\{R^j\}$ – множество культур в контуре “j”.

Динамика подачи воды и ее распределение в ирригационной системе описывается уравнениями [9]-[12]. Полагая, что даты каждого полива определены, для оптимального распределения водных ресурсов на орошение, можно сформулировать следующий критерий:

$$\aleph(q_{r,j}(\bullet)) = \sum_{j\in\{J\}} [\sum_{r\in\{R^j\}} [\int_{t\in\{T\}} q_{r,j}(t) \times \alpha_{r,j}(q_{r,j}(t) - q^0{}_{r,j}(t))^2 dt]] \rightarrow \boldsymbol{min} \qquad [20]$$

Критерий [20] отражает экономию водных ресурсов в контурах орошения, но совершенно не учитывает специфику работы внутрихозяйственной оросительной сети. Резкие колебания расходов в канала порождают неизбежные потери воды в виде холостых сбросов, объемы которых, можно формализовать в виде:

$$\mathrm{W}(q_c(\bullet)) = \sum_{c\in\{C\}} \int_{t\in\{T\}} \beta_c \times q_c(t) \times [\frac{\partial q_c(t)}{\partial t}]^2 dt,\ \forall\, j \in \{\mathrm{J}\},\ t \in \{\mathrm{T}\} \qquad [21]$$

Для завершения формулировки задачи оптимального управления остается указать среди каких функций будет искаться экстремум (***min***) [20]. Задача [9]-[13], [18]-[20] относится к классу задач оптимального управления с закрепленным временем, для которых допустимым решением является совокупность $q_{r,j}(\bullet)$, при выполнении следующих требований:

1. вектор-функция $q_{r,j}(\bullet)$ определена, и кусочно непрерывна на отрезке $\{T\}$;
2. для всех $t \in \{T\}$ выполняется условие [18];
3. выполняются граничные условия [9], [10];
4. функции $q_{out}(t)$ и $w_{r,j}(t)$ определены и кусочно непрерывны на отрезке $\{T\}$,(эти функции неуправляемы, поскольку характеризуют требования со стороны транзита и орошаемых площадей).

Именно среди таких допустимых решений будет искаться экстремум [20]. Эта задача называется задачей оперативного управления водораспределением в оросительных системах, на основе результатов которой, уточняются объемы подачи водных ресурсов, в соответствии с выделенными лимитами, и назначается режим работы гидротехнических сооружений. Следующим этапом в решении задач оперативного управления является этап корректировки плановых расходов в соответствие с реально складывающейся водохозяйственной обстановкой. В терминах

теории оптимального управления вторая задача классифицируются, как задача синтеза управления или проектирования оператора обратной связи (Моисеев, 1971). Эта задача принципиально отличается от предыдущей задачи, определения программной траектории, как по критериям качества, участвующим в формировании функционала, так и по методам решения. Назначение этой задачи – реализация найденной программной траектории, которая является заключительной в любом процессе управления. Важность правильного решения этой задачи определяется тем, что, если ошибки или отклонения в определении программной траектории приводят к экономическим потерям, то плохо спроектированный оператор обратной связи резко снижает управляемость всей оросительной системой и влечет за собой увеличение потерь водных ресурсов. В общем случае эта задача гораздо труднее прямой задачи оптимального управления, как по причине отсутствия регулярных методов ее решения, так и по причине отсутствия необходимых условий, которые служат отправной точкой при построении аналитических моделей.

Результаты

В качестве объекта натурных исследований принято хозяйство «Азизбек-1» Ахунбабаевского района, Ферганской области. Подача воды на орошаемую территорию осуществлялась через водовыпуск «Пахтакор 4» на Большом Ферганском Канале, по трем основным направлениям с помощью девяти распределительных каналов (с С1 по С9). Канал С2, помимо орошения исследуемой территории, выполнял транзитную подачу воды. Схема оросительной сети приводится на рис. 3, где нумерация водоотводов совпадает с нумерацией полей. Графики поливов по земельным выделам хозяйства «Азизбек-1» (при минимальных потерях урожая, оптимальном варианте поливов) были определены с помощью модели ISAREG и приведены в таблицах 1 и 2.

Модель ISAREG (Pereira *et al.*, 2003; Фортес *и др.*, 2005) дает графики полива, которые могут быть оптимизированы по нормам и датам полива для увязки с ограничениями оросительной сети и пропускной способности, по режиму работы (равномерность межполивных интервалов, стабильность расхода) и решению оптимальных требований контура с помощью модели СППР SEDAM (Гонсалвес *и др.*, 2005b).

В результате определенный график оказался крайне неудовлетворительным по требованиям системы (рис. 4а) как по максимальным расходам (до 280 л/с при допустимом 200 л/с), так и по колебаниям расходов. Ожидая эти ограничения от использования отдельно модели ISAREG и оценок полива на поле, были разработаны модели СППР SADREG и SEDAM (Гонсалвес *и др.*, 2005a, b), но не было времени протестировать их на данном практическом примере.

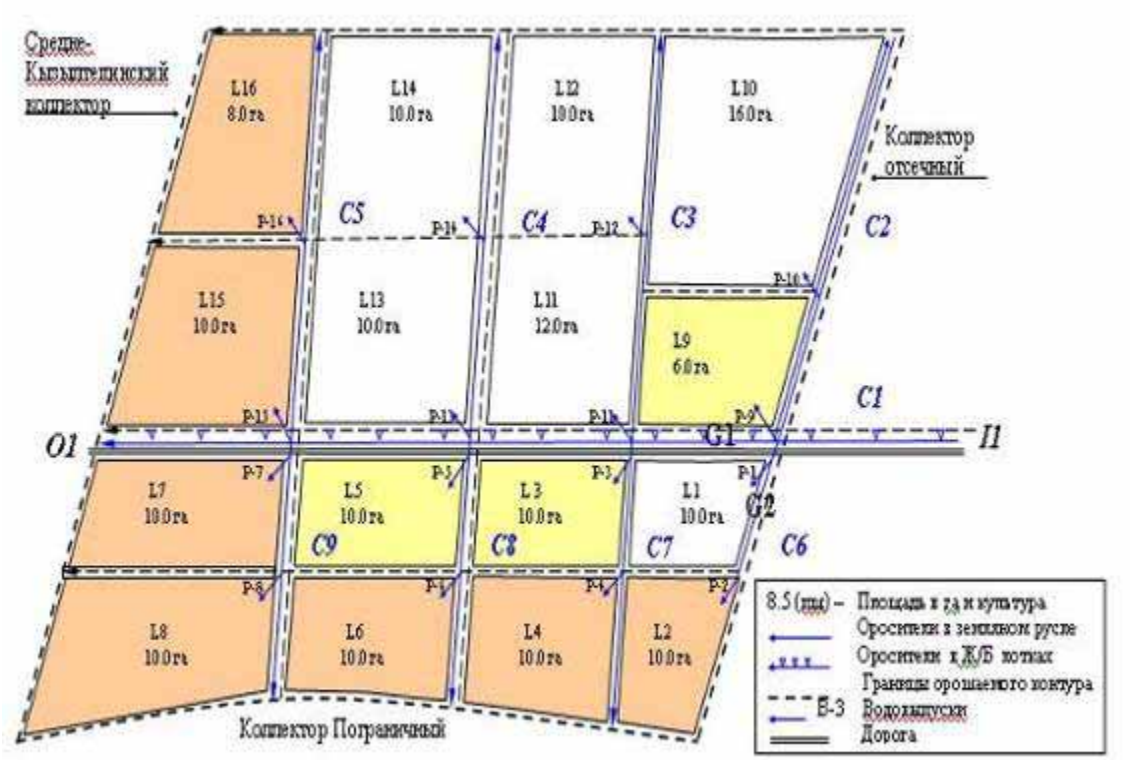


Рис. 3. Схема оросительной сети исследуемого участка

В схеме используются следующие обозначения:
I1 – приток (в контур орошения); O1 – отток (транзит);
G1, G2 – гидропосты; C1-C9 – каналы; L1-L16 – орошаемые поля;
P1-P16 – водоотводы на поля
I1 – вход (приток в контур орошения); O1 – выход (транзит); G1, G2 – гидропосты;
C1-C9 – каналы; L1-L16 – орошаемые поля; P1-P16 – водоотводы на поля.

- □ – хлопок
- ■ – пшеница
- ■ – кукуруза

Таблица 1. Нормы и сроки полива полей по требованиям графика поливов
(нормы полива для озимой пшеницы (мм))

№ поля	2	Срок	23/10	19/04	9/05	29/05
		Норма	80	80	80	80
	3	Срок	23/04	18/05	5/06	
		Норма	82	83	84	
	4	Срок	19/10	20/04	10/05	27/05
		Норма	80	80	80	80
	5	Срок	22/10	18/04	13/05	2/06
		Норма	80	80	80	80
	6	Срок	17/10	1/05	25/05	
		Норма	80	84	85	
	7	Срок	12/10	27/04	19/05	8/06
		Норма	80	80	80	80
	8	Срок	13/10	26/04	19/05	7/06
		Норма	80	82	82	80
	9	Срок	18/10	28/04	17/05	5/06
		Норма	80	80	80	80
	15	Срок	17/10	29/04	21/05	12/06
		Норма	80	82	80	80
	16	Срок	11/10	25/04	17/05	7/06
		Норма	80	80	80	80

Срок* – рекомендуемая дата полива, норма* – слой полива

Таблица 2. Нормы и сроки полива полей по требованиям графика поливов
(нормы полива для хлопчатника (мм))

№ поля	1	Срок*	16/05	05/06	23/06	5/07	21/07	7/08
		Норма**	80	80	80	80	84	95
	10	Срок	14/05	3/06	21/06	3/07	19/07	5/08
		Норма	80	80	80	80	90	93
	11	Срок	15/05	4/06	22/06	4/07	20/07	6/08
		Норма	80	80	80	80	83	95
	12	Срок	14/05	3/06	21/06	3/07	19/07	5/08
		Норма	80	80	80	80	90	100
	13	Срок	18/05	7/06	25/06	7/07	22/07	11/08
		Норма	80	80	80	80	85	92
	14	Срок	18/05	7/06	25/06	7/07	23/07	9/08
		Норма	80	80	80	80	90	95

Срок* – рекомендуемая дата полива, норма* – слой полива

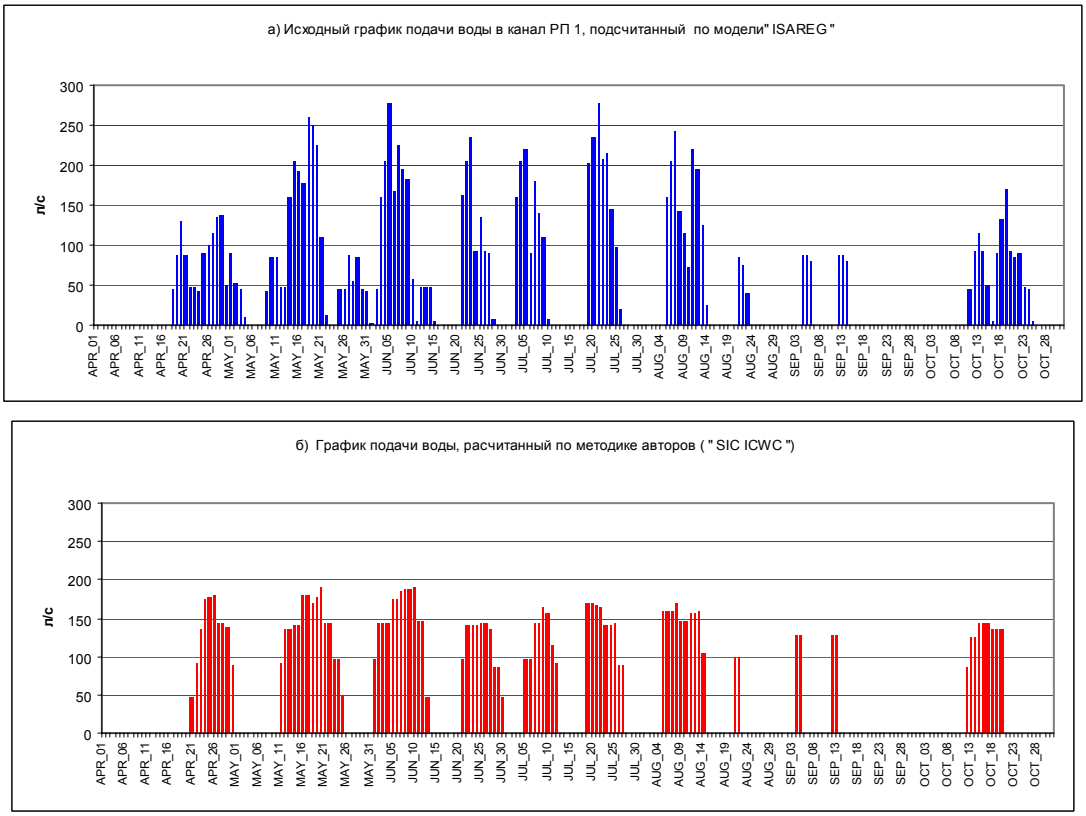


Рис. 4. Результаты моделирования требований на орошение с помощью ISAREG (а) и проведенного НИЦ МКВК с ограничением допустимых расходов до 200 л/с (б) (фактический график представлен на рис. 1)

Моделирование оптимального варианта с учетом требований канала было проведено при ряде допущений, установленных с учетом условий технологии полива и агротехники: - отклонения в сроках полива не более 4 дней; отклонения в периодах полива ± 5 %; межполивной период – 10-15 дней. Оптимальный режим также представлен в варианте 4б, который вписывается в вышеуказанные требования.

Были выполнены две оценки: фактической подачи и распределения воды в 2001 году и этих же параметров, рассчитанных по ISAREG без оптимизации и по упомянутой методике моделирования (таблица 3).

Таблица 3. Сопоставление двух альтернативных режимов требуемой и расчетной водоподачи с текущим режимом

Показатели	Текущее управление (факт)	по ISAREG без оптимизации	Математическое оптимизационное моделирование
Степень водообеспеченности:			
по объему*	1.876	0.6	1.0
по времени	± 12 дней	± 0 дней	± 3 дня
Коэффициент равномерности**	1.8	1.6	1.0
Организационные потери в каналах (%)	26	24	3
Организационные потери в поле (%)	22.7	15.0	15.0
Степень стабильности в подаче**	1.8	2.1	1.0

*отношение фактической водоподачи к требованиям на воду
**отклонение от среднего показателя

Вариант 1 (текущее управление) привел к большому объему переподачи, большим организационным потерям на полях и в каналах, очень нестабильным условиям работы канала и низкому коэффициенту равномерности (рис. 5). Эта неравномерность отразилась не только на показателях одного полива, но также на степени обеспеченности водой всего вегетационного периода (рис. 6). Таким образом, сопоставление (таблица 3) дает следующее:

- фактически водопотребители получили на 87 % воды больше, чем им требовалось, но со смещением сроков полива до ± 12 дней; равномерность распределения воды составила 1,8, суммарные организационные потери в поле и в каналах достигли почти 50 %; степень стабильности составила 1,8;
- при поливе по требованиям ISAREG не имелось сдвижки в сроках полива, но не удалось удовлетворить потребности полей из-за недостаточно пропускной способности канала; суммарные потери составили 39 %, а неравномерность и нестабильность соответственно 1,6 и 2,1;
- при предлагаемом подходе отклонения от потребных сроков полива не превысили ± 3 дня, суммарные организационные потери составили 18 %, степень стабильности, водообеспеченности и равномерность – 1,0.

Второй вариант не может быть обеспечен из-за характеристик канала и результаты не были удовлетворительными. Однако, этого можно было ожидать, поскольку модель ISAREG разработана только для поливов на уровне поля и ее применение на уровне контура или более высоком уровне требует других приближений, как это показано на примере применения модели в Северном Китае (Gonçalves et al., 2003).

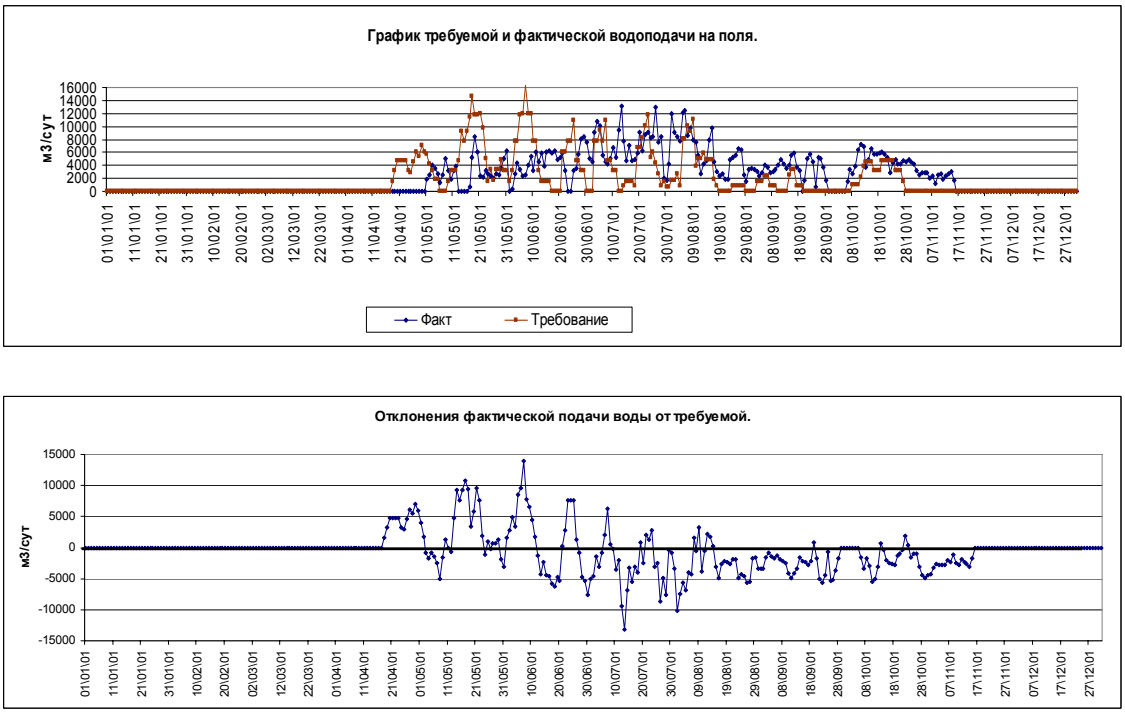


Рис. 5. Вверху: сравнение требуемой и фактической подачи воды ($м^3$/га) в канале в течение сезона выращивания хлопчатника, Фергана; внизу: разница между фактической и требуемой водоподачей

Модель подачи и распределения воды на поля, на основе уравнения комбинированного функционирования водоподачи и требований каждого поля, дала:

- минимальный сток с поля в качестве эксплуатационного сброса
- минимальные организационные потери в каналах
- максимальное приближение к срокам полива и удовлетворение требований культур на воду в соответствии с требованиями, определенными с помощью ISAREG.

Приведенный здесь рекомендуемый метод моделирования может повысить общую эффективность водопользования в хозяйстве более чем на 30 %. Комбинирование данного метода с СППР SEDAM может привести к последующим улучшениям.

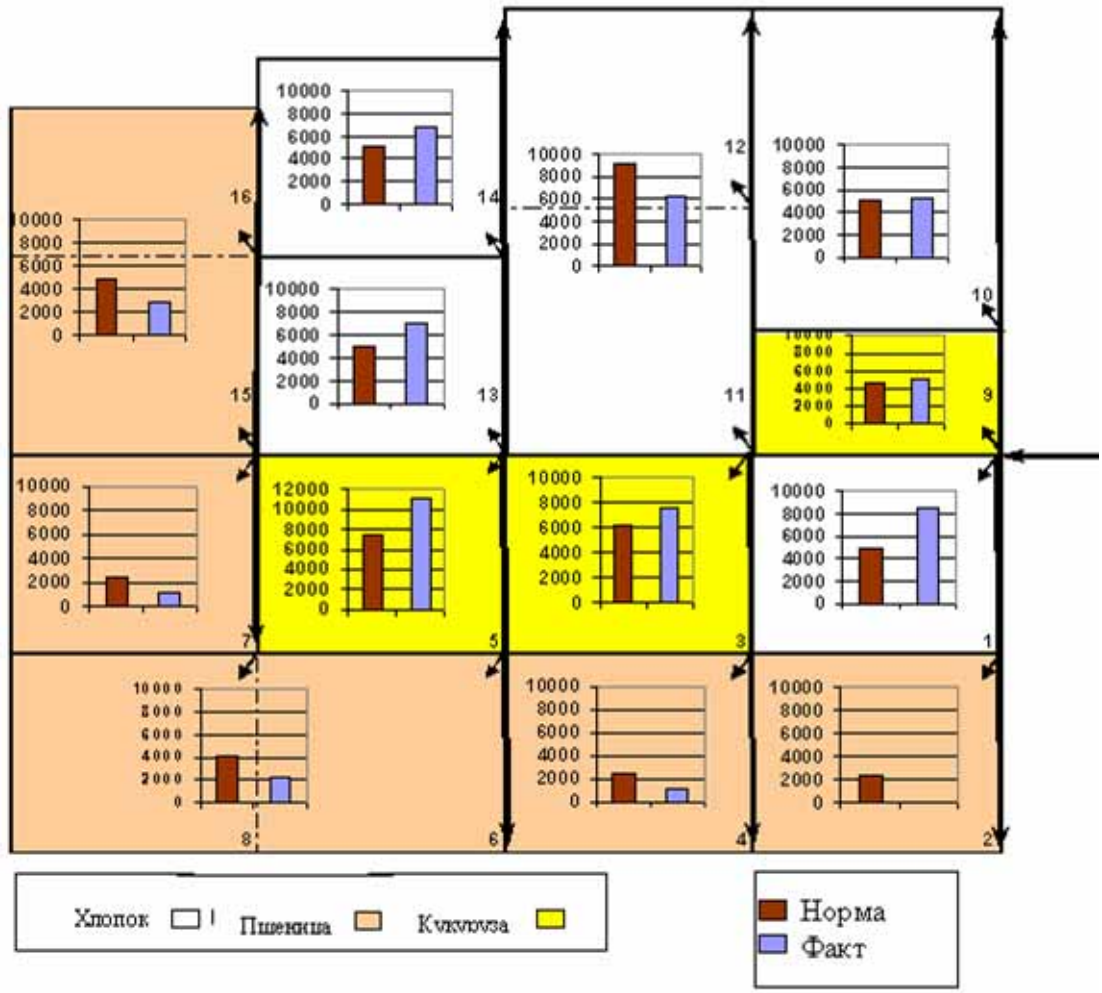


Рис. 6. Требуемые (норма) и фактические (факт) объемы водоподачи ($м^3$/га) на поле в течение вегетации хлопчатника (апрель-сентябрь 2001 г) в хозяйстве «Азизбек-1» (поля те же, что и на рис. 3)

Результаты проекта также показали, что применение принципов интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР) не может быть ориентировано только на институциональные и правовые реформы, но – это должно быть включено в качестве основного компонента – и на вовлечение новых управленческих и технических инструментов в управлении водой и орошаемым земледелием. Эта часть ИУВР должна дать ясное понимание того, где, как и с помощью какого инструмента мы можем бороться с плохим управлением в секторе орошения – главным недостатком текущей ситуации в Центральной Азии.

Ожидаемыми результатами от перехода к новым совместным инженерным и управленческим аспектам ИУВР могут быть переход к более

совершенным оценкам водопотребления и водопользованию, ориентированному на уровень поля и сельхозкультуры и адаптированного к изменчивости климата относительно среднемноголетних значений эвапотранспирации и местным почвенным условиям, при потенциальном сбережении 12-15 % от объема водоподачи. Помимо этого, минимизация эксплуатационных потерь, вызванных разъединенностью и отсутствием взаимосвязи между иерархическими уровнями, может привести к сбережению 8-15 % от объема водоподачи, а также к повышению продуктивности земель на 20-30 %. Тем не менее, требуется продолжение работ для успешного внедрения представленных здесь подходов моделирования в практику управления оросительными каналами.

Библиография

Духовный., В.А., 1983, Ирригационные комплексы на новых землях Средней Азии. - Ташкент, “Узбекистан”, 184 стр.

Духовный, В.А.,Тучин, А.И., 2001. «Управление ирригационными системами», Сб. МФСА, НИЦ МКВК №5, Ташкент, стр. 4 – 10.

Гонсалвес, Дж.М., Хорст, М.Г., Ролим, Дж.,Матеус, Р., Муга, А.Р., 2005a. Sadreg – сппр (система поддержки принятия решений) при поверхностном орошении (в этой книге).

Гонсалвес, Дж.М., Матеус, Р., Кампос, А.А., Муга, А.Р., 2005b. Моделирование требований на орошение и водораспределение: модель DSS SEDAM (в этой книге).

Лаукс, Д., Стединжер, Дж., Хейт., Д., 1984. Планирование и анализ водохозяйственных систем. Энергоатомиздат, М., 400 стр.

Моисеев, Н.Н., 1971. Численные методы в теории оптимальных систем. М., Наука, 424 стр

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 этой книге).

Gonçalves JM, Pereira LS, Campos AA, Fabião MS, 2003. Demand and delivery simulation and multi-criteria analysis for water saving. In: Pereira LS, Cai LG, Musy A, Minhas PS (eds.), Water Savings in the Yellow River Basin. Issues and Decision Support Tools in Irrigation. China Agriculture Press, Beijing, pp. 247-272.

Pereira, L. S., Teodoro P. R., Rodrigues P. N., Teixeira J. L., 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, Oweis, T. Shatanawi, M. Zairi A. (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.

Глава 18.

SADREG – СППР (СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ) ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ОРОШЕНИИ

Дж.М. Гонсалвес[30], М.Г. Хорст[31], Дж. Ролим[30], А. Муга[30]

Реферат: Для поддержки решений при проектировании и управлении внутрихозяйственными оросительными системами была разработана и применена на орошаемых землях одного из районов Ферганской области система поддержки принятия решений - DSS SADREG. В соответствии с выбранными пользователем критериями SADREG генерирует и ранжирует альтернативные сценарии усовершенствований. Модель состоит из двух компонентов: проектирование и выбор. Первый использует информацию базы данных, включая ГИС, и продуцирует набор альтернативных проектных решений, характеристики которых затем используются для выбора решения соответственно установленным пользователем критериям. Специалист, принимающий решения, выражает свои предпочтения и приоритеты при выборе при помощи диалоговой структуры интерфейса. SADREG применяется для полей прямоугольной формы, в предположении однородности характеристик впитывания. Модульные компоненты DSS включают базу данных, доступ к которой может быть осуществлен через ГИС, математические модели и модель многофакторного анализа. База данных описывает размеры полей и топографию, интенсивность впитывания, влагоудерживающую способность почвы, данные по сельхозкультуре, данные по режиму орошения, создаваемые через интерактивную модель ISAREG, и экономическую информацию. Модель поверхностного полива включает: модуль планировки земель, который использует итерационную оптимизацию отметок поверхности земли с минимальным перемещением почвогрунта, и модель SIRMOD для проектирования поверхностного полива. Обе модели ISAREG и SIRMOD перед их применением были подтверждены и параметризованы с использованием соответствующих полевых экспериментов и испытаний. Рассматриваемые внутрихозяйственные системы водораспределения относятся к системам с непрерывным и дискретным (с автоматическим или ручным переключением) поливом из гибких шлангов с водовыпусками, жестких трубопроводов с водовыпусками, железобетонных лотков

[30] Agricultural Engineering Research Center, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal. E-mail: lspereira@isa.utl.pt

[31] Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ), Карасу-4, дом11, Ташкентт, 700187, Узбекистан. E-mail: horst_san@mail.ru

с боковыми отверстиями-водовыпусками и необлицованных оросителей с сифонами или без них. Пользователь может корректировать длину поля/борозд и учесть повторное использование сброса. Анализ оценок включает расчеты затрат и прибыли и параметры, связанные с воздействием на окружающую среду. Статья описывает инструментарий DSS и его использование на примере полива по бороздам в Ферганской области. Результаты демонстрируют полезность этого инструментария при поиске возможных усовершенствований систем поверхностного полива.

Ключевые слова: полив по бороздам, характеристики полива, Центральная Азия, проектирование полива, многофакторный анализ, система поддержки решений (DSS).

Введение

Усовершенствование внутрихозяйственных оросительных систем для больших орошаемых территорий может быть достаточно хорошо поддержано средствами DSS, которые можно применить как на уровне поля, так и при объединении с ГИС (географическая информационная система), так и на уровне сектора (площадь, обслуживаемая веткой канала и соответствующими распределителями). В данной статье рассматривается пример совершенствования и применения новой версии SADREG (Gonçalves et al., 1998; Gonçalves & Pereira, 1999) в условиях Центральной Азии. Целью DSS является содействие проектировщикам и менеджерам в процессе проектирования и планирования усовершенствований внутрихозяйственных оросительных систем. SADREG включает базу данных, математические модели и дружественный пользователю интерфейс; и позволяет ранжировать и выбирать проектные альтернативы через многофакторный анализ решений.

Область применения SADREG включает: (а) анализ отдельного поля, связанный с альтернативными вариантами проектирования полива по бороздам, чекам или полосам, с учетом нескольких переменных в рассматриваемых решениях, таких как уклоны поля, способы водоподачи и оборудование, а также возможность повторного использования сброса; (б) анализ орошения множества полей (уровень сектора), когда пространственно распределенная база данных, связанная с внутрихозяйственными системами, доступна через ГИС, и когда альтернативы усовершенствования оцениваются совместно с вариантами модернизации, связанными с сетью водоподачи и водораспределения. Это тот случай, когда используется модель SEDAM, представляющая DSS для моделирования и оценки усовершенствований требований на орошение и водоподачу на уровне сектора (Гонсалвес и др., 2005). Связь между SADREG и SEDAM через ГИС описана Гонсалвесом и соавторами (2005).

SADREG – полезный инструментарий для поиска и анализа решений по модернизации поверхностного полива, потому что проектирование систем поверхностного полива подразумевает выбор среди большого количества комбинаций основных факторов, таких как например инфильтрация и влагоудерживающая способность почвы; размеры поля, уклоны и топография; водопотребление сельхозкультур и расходы водоподачи, которыми становится легче манипулировать и ранжировать при помощи DSS. Когда рассматриваются несколько полей внутри орошаемого района, то решение задачи становится возможным только, если доступна пространственно распределенная база данных. Кроме того, SADREG постигается таким манером, что пользователь может совершенствовать свои знания в процессе применения этой модели.

В описываемом далее случае применения SADREG в Центральной Азии график полива сельхозкультур был получен на основе расчетов моделью ISAREG, включающей версию GISAREG (Фортес и др., 2003,2005), подтвержденной на основных сельхозкультурах (Чолпанкулов и др., 2005). В DSS использовались полевые эксперименты, проведенные в Ферганской области, обеспечившие соответствующую параметризацию модели поверхностного полива (Хорст и др., 2005a, b). Эта статья относится к анализу отдельного поля и описывает обе модели DSS и их использование на примере полива по бороздам в Ферганской долине, Узбекистан.

Модель DSS

SADREG состоит из двух компонентов: проектирование и выбор (рис. 1). Первый из них, используя информацию базы данных, продуцирует набор альтернативных проектов, характеристики которых применяются затем при ранжировании и выборе проектного решения. Компонент выбора основан на многофакторном анализе, в котором для выбора лучшего решения альтернативные проекты ранжируются согласно критериям, устанавливаемым специалистом, принимающим решения. При помощи диалоговой структуры интерфейса специалист, принимающий решения, участвует на протяжении всего процесса проектирования, выражая свои предпочтения и приоритеты, требуемые в последующем для ранжирования и выбора альтернатив.

Модульные компоненты DSS включают базу данных, доступ к которой может быть осуществлен через ГИС, математические модели и модель многофакторного анализа (рис. 2). База данных описывает размеры полей и топографию, интенсивность впитывания, влагоудерживающую способность почвы, экономические данные, данные по сельхозкультуре и данные управления поливами, создаваемые через интерактивную имитацию моделью ISAREG.

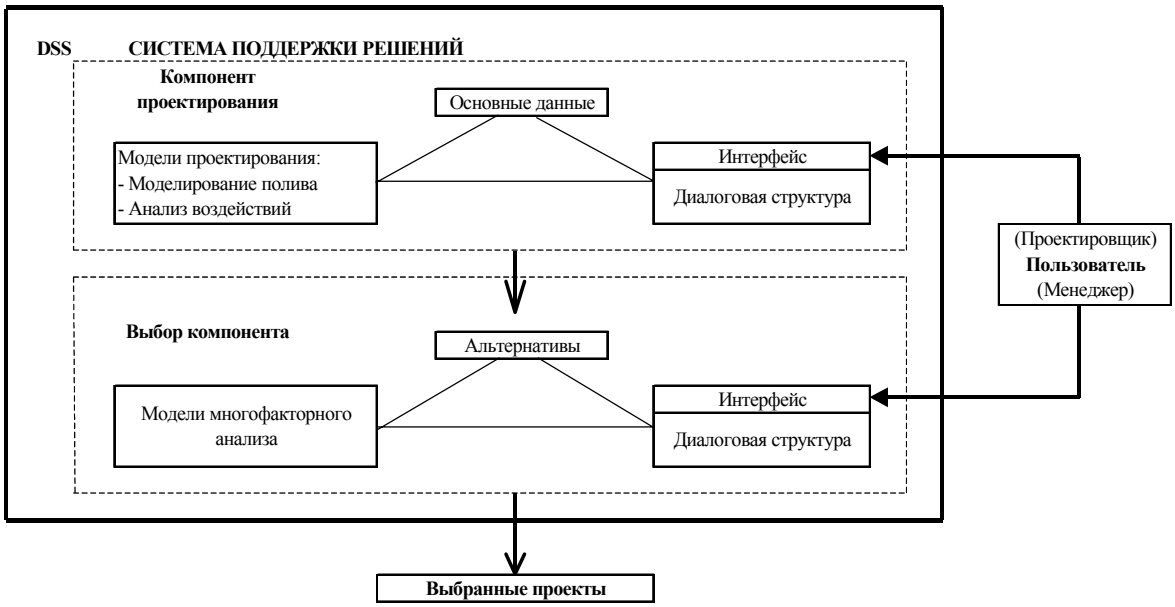


Рис.1. Концептуальная структура SADREG

Рис. 2. Модульные компоненты SADREG

SADREG применяется для поля прямоугольной формы с однородными характеристиками впитывания и для одной возделываемой на этом поле сельхозкультуры. Вода подается из коллективной системы транспортировки воды через гидрант/водовыпуск, который имеет определенные гидравлические характеристики, такие как максимальные расход и на-

пор/командный уровень. Эти данные могут относиться к существующей системе или выбираться пользователем.

Модель поверхностного полива включает: модуль планировки земель, который использует итерационную оптимизацию отметок поверхности земли с минимальным перемещением почвогрунта (рис. 3), и модель SIRMOD (ISED, 1989) для проектирования поверхностного полива (рис. 4).

Внутрихозяйственные системы поверхностного полива могут относится к поливу по чекам, полосам и бороздам. Последний касается непрерывной водоподачи в борозды и дискретного регулирования водоподачи с автоматическим или ручным управлением. Поливные устройства – это гибкие шланги с водовыпусками, поливные трубопроводы с водовыпусками, железобетонные лотки с боковыми отверстиями-водовыпусками и необлицованные оросители с сифонами или без них. Пользователь может рассмотреть несколько вариантов, включая повторное использование сбросных вод и подбор длины поля/борозд. Вариант подбора длины поля/борозд может представлять интерес для длинных полей путем оценки выигрыша в эффективности использования поливной нормы в сравнении с повышением затрат на оплату труда и эксплуатационные затраты. Анализ оценок относится к затратам и прибылям, а также к экологическим и эксплуатационным показателям.

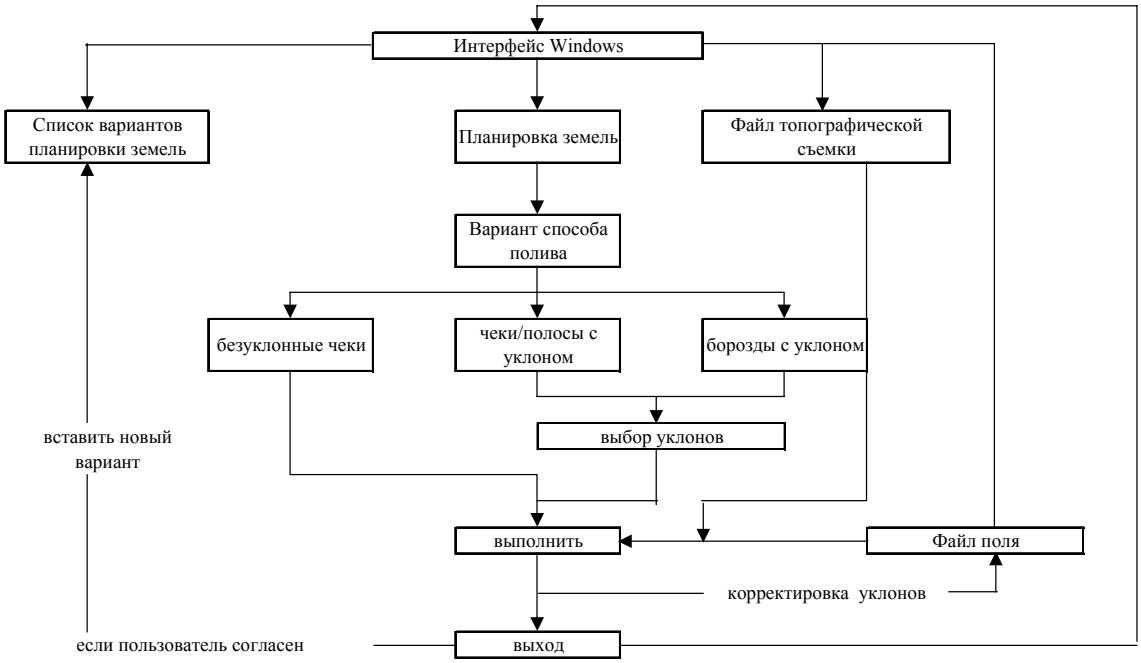


Рис. 3. Блок-схема модуля планировки земель

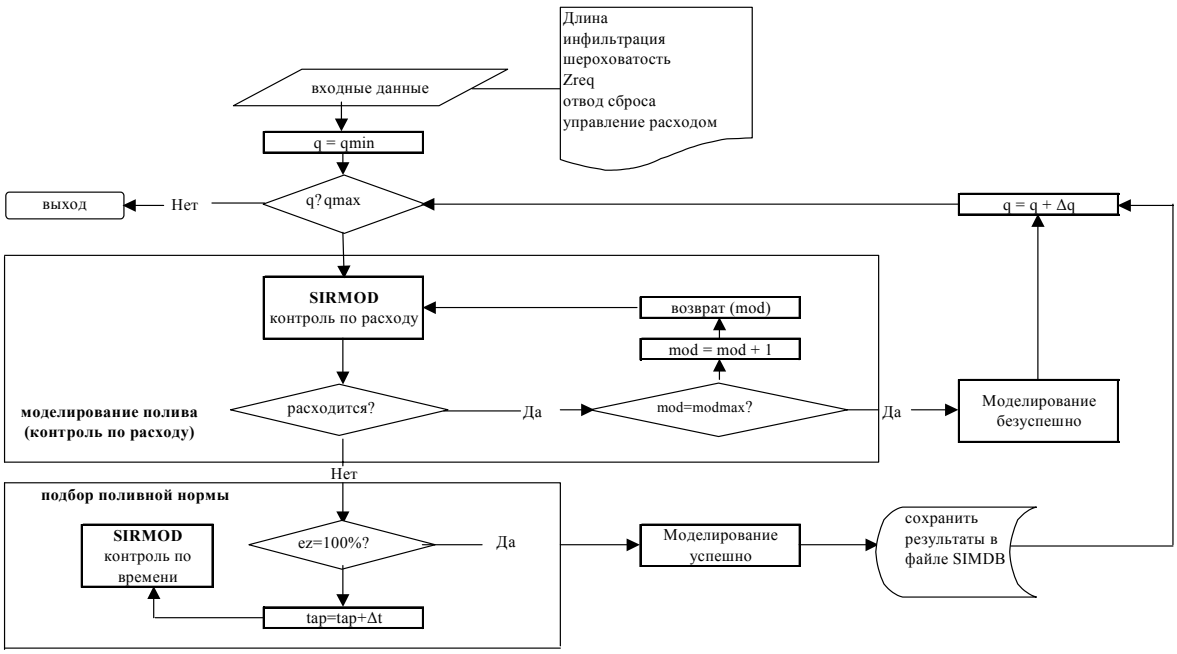


Рис. 4. Блок-схема использования программы SIRMOD

Применение SADREG

Основные шаги применения SADREG:

1. Идентификация характеристик поля;

2. Разработка сценария, связанного с переменными значениями проектного решения, такими как водоподача на поле, режим орошения сельхозкультуры, расстояние между поливаемыми бороздами, управление допустимым истощением почвенной влаги в корнеобитаемой зоне (MAD) и режим водоподачи в борозды (непрерывный или дискретный);

3. Входные данные, относящиеся к данным о содержании почвенной влаги, параметрам инфильтрации и гидравлической шероховатости, основанные на полевых экспериментах и/или из базы данных, данные по сельхозкультуре, затраты на эксплуатацию и оборудование, труд, использование машин и механизмов и характеристики водоподачи, такие как гидравлический напор и количество и расход гидрантов/водовыпусков;

4. Процедура проектирования для создания альтернатив, использующих обе модели, описанных выше (рис. 2), связанных с рассматриваемыми сценариями (см. пункт 2);

5. Ранжирование и выбор альтернативных проектов с использованием многофакторного анализа, в котором весомость показателей определяется соответственно приоритетам пользователя.

Для выполнения этой последовательности операций необходимо понять основную концепцию и иерархию элементов, составляющих структуру данных SADREG. Основные термины концепции:

- **Поле [Field] –** участок земли прямоугольной формы с хорошо известным географическим расположением, с однородными характеристиками впитывания в почвогрунты и водоподающих гидрантов/водовыпусков; это – элемент частного фермерского хозяйства, располагающегося в контурах Ассоциации водопользователей
- **Гидрант/водовыпуск [Hydrant] –** оборудованный затвором водовыпуск из канала- распределителя, через который осуществляется водоподача на поле
- **Полевой водовыпуск [Outlet] –** точка распределения расхода внутри поля, соединенная с системой распределения по полю; поле может иметь несколько полевых водовыпусков.

Структуру данных SADREG можно описать следующим образом (рис. 5):

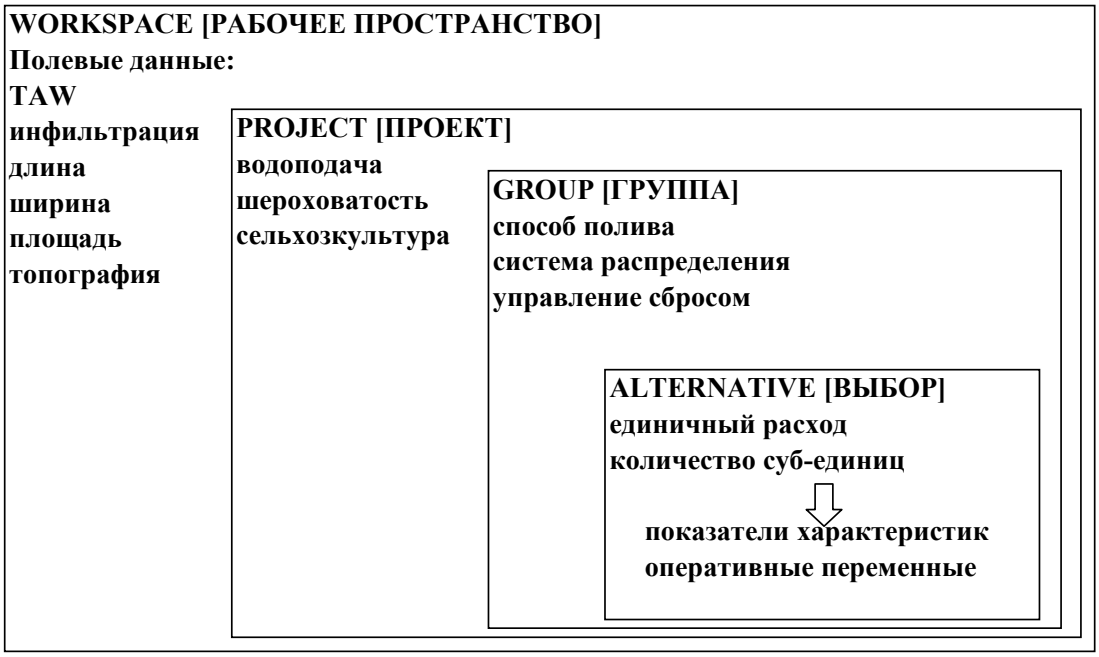


Рис.5. Элементы структуры данных SADREG

- **Рабочее пространство [Workspace]** – основной элемент структуры данных SADREG; соответствует отдельному Полю и включает все файлы данных. Информация для каждого Поля включает: месторасположение; размеры; агрономические данные; данные топографической съемки и т.д.

- **Проект [Project]** – каждый проект является полевым сценарием при проектировании выбранного поля. Для каждого Workspace можно создать несколько проектов с разными именами
- **Альтернатива** [**Alternative**] – завершенное проектное решение для выбранного поля
- **Группа альтернатив [Group of alternatives]** – группа, отличающаяся структурными переменными решения (например, планировка земель, способ полива, оборудование); внутри группы альтернативы отличаются используемыми значениями (удельными расходами водоподачи и длительностью полива) и количеством поливных делянок
- **Организационная единица [Unit]** – подразделение поля – поливной участок, орошаемый из одного гидранта-водовыпуска; считается, что все поливные участки на одном поле одинакового размера
- **Суб-единица [Sub-unit]** – поливная делянка – это часть поливного участка, которая поливается одновременно.

Для создания различных альтернатив в рамках одного проекта необходимо иметь в виду существование связей между отдельно взятыми вариантами проектирования полива (рис. 6). Таким образом, генерацию альтернатив можно описать следующим образом:

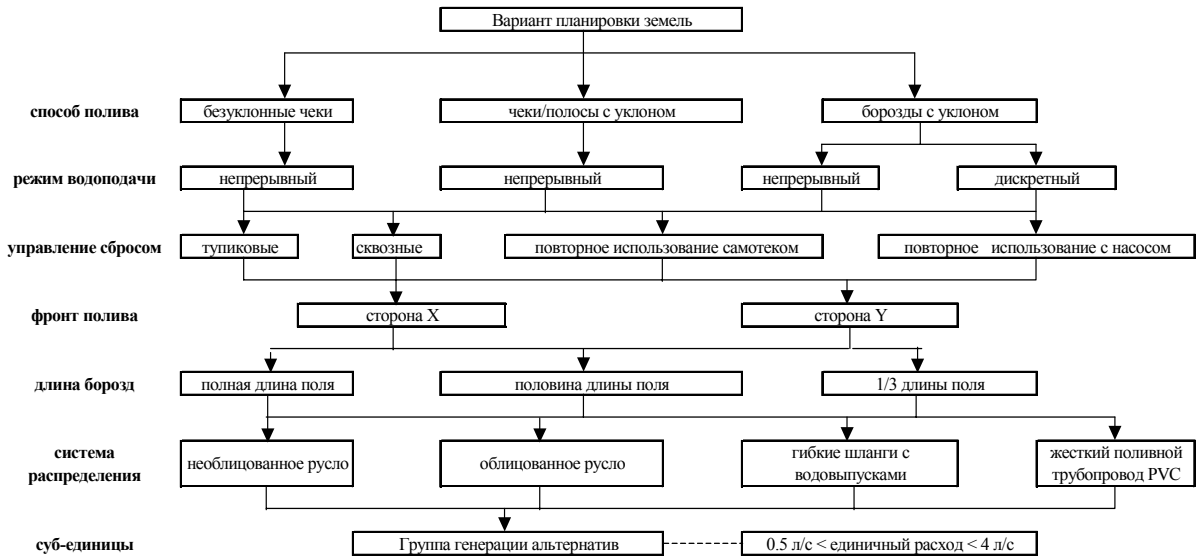


Рис.6. Переменные проектирования в процедуре генерации альтернатив

1. Выбрать способ полива: безуклонный чек, чек или полоса с уклоном или борозды с уклоном.
2. Подобрать режим водоподачи: для чеков и полос – непрерывный с постоянным расходом; для уклонных борозд он может быть дискретным.

3. Выбрать систему распределения воды: жесткие трубопроводы, гибкие трубопроводы, каналы в земляном русле или облицованные каналы; если выбран дискретный полив, то также выбирается система переключения – ручная или автоматическая.
4. Выбрать способ управления концевым сбросом: для чеков – обвалование, полосы и борозды могут быть тупиковыми, сквозными без повторного использования сброса или с повторным использованием сброса при помощи насоса или с самотечным повторным использованием сброса.

Как только выбраны варианты проектирования, программа, как это показано на рис. 7, генерирует альтернативы проектирования.

Варианты пользователя для генерации альтернатив при поливе по бороздам (таблица 1) можно описать следующим образом:

- Полевые водовыпуски: количество на поле и соответствующие расход и напор; предполагается, что все водовыпуски идентичны по характеристикам и к каждому подвешена одинаковая площадь, именуемая организационной единицей – поливным участком
- Верхняя (относительно фронта полива) сторона водоподачи: сторона X или Y или обе
- Планировка поверхности земли: поперечный и продольный уклоны поля
- Корректировка длины борозд: полная длина, 1/2 или 1/3 длины, т. е. без корректировки или с уменьшением длины борозд от половины до одной трети от фактической длины поля (рис. 8)

Таблица 1. Переменные проектирования

	Переменные проектирования
топографические (варианты планировки поверхности поля)	- сторона водоподачи (X или Y) - длина поля (подбор) - поперечный уклон - продольный уклон
система водоподачи	- количество водовыпусков - расход и напор на водовыпуске
система распределения внутри поля	- канал, гибкие, жесткие трубопроводы
система повторного использования	- при помощи насоса - самотеком на другие поля
обслуживание	- поливной модуль (число суб-единиц - поливных делянок)

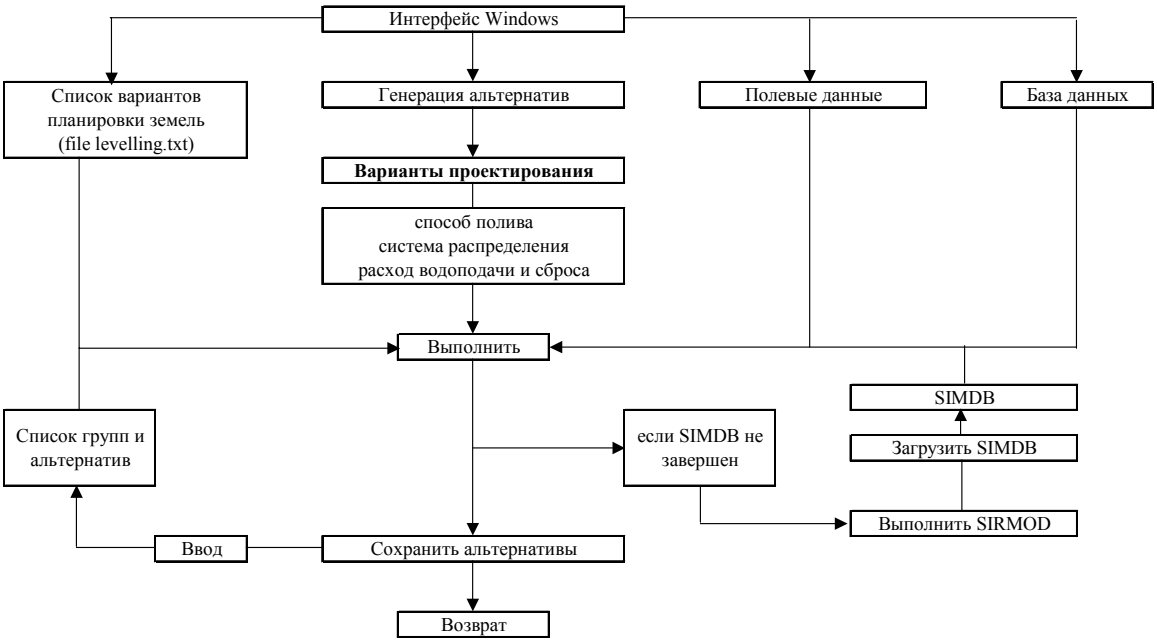


Рис. 7. Блок-схема модуля генератора альтернатив

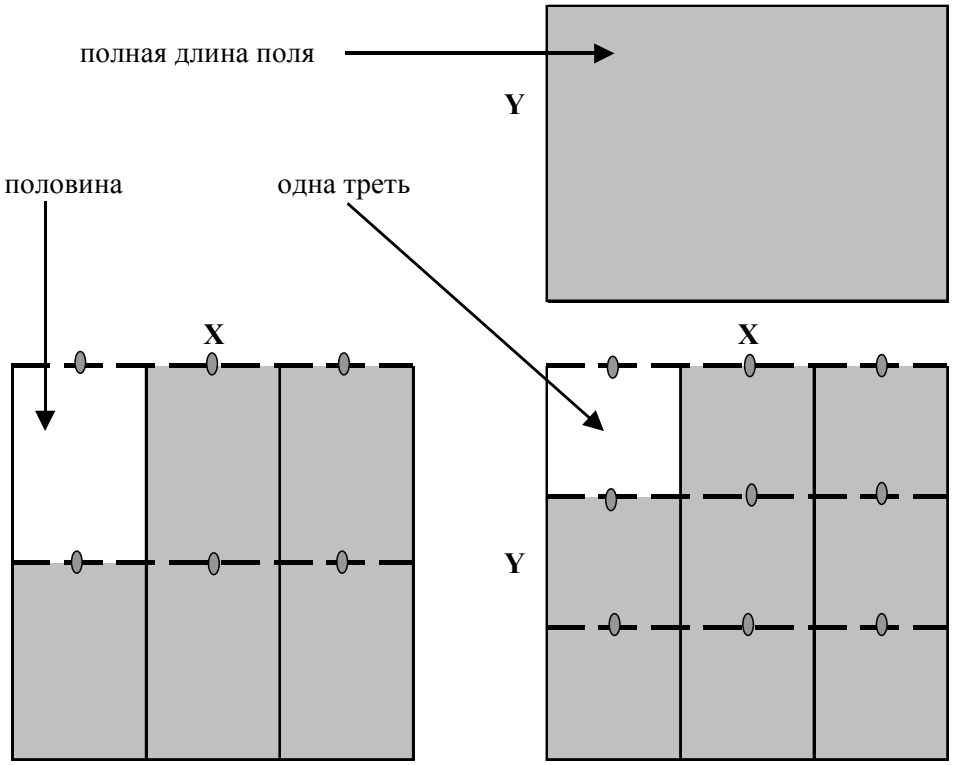


Рис.8. Схема подбора длины поля, включая многоярусный полив

- Система распределения воды по полю: жесткий трубопровод, канал в земляном русле или облицованный канал (рис. 9)
- Управление концевым сбросом: тупиковые, сквозные (полосы и борозды) или повторное использование при помощи насоса или самотеком на нижерасположенных полях
- Режим водоподачи: непрерывный или дискретный; управляемый автоматически или вручную
- Схема поливов сельхозкультур, в каждую борозду или через борозду.

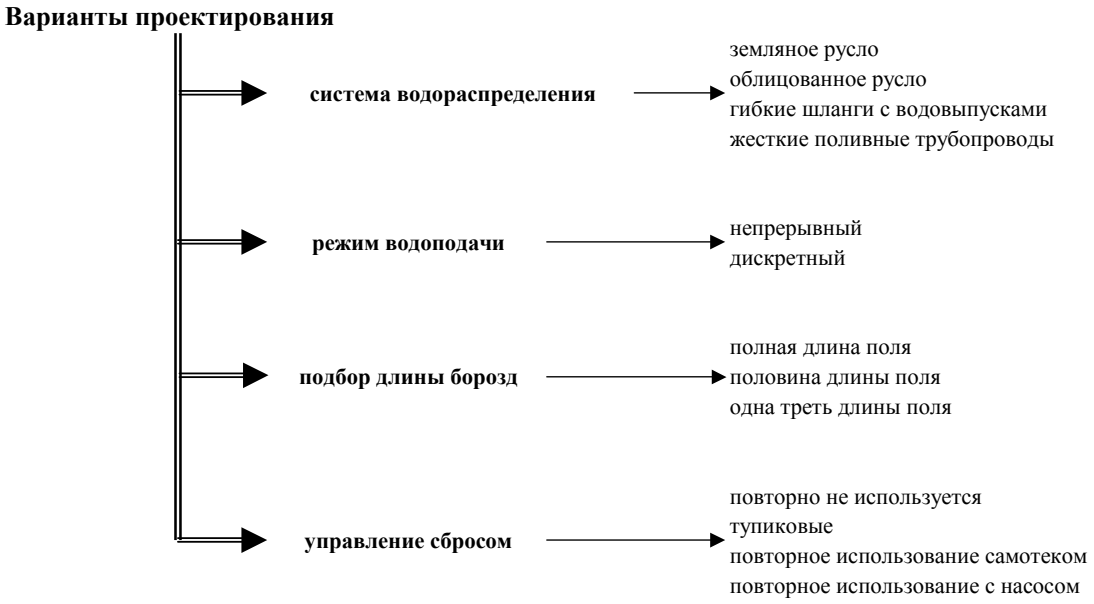


Рис.9. Варианты проектирования

К критериям, используемым при оценке проектных решений относятся следующие: суммарное использование воды ($м^3га^{-1}год^{-1}$), физическая продуктивность использования земли (кг/га), экономическая продуктивность использования земли (денежная единица/га), физическая продуктивность использования воды ($кг/м^3$), экономическая продуктивность использования воды (денежная единица/$м^3$), коэффициент полезного использования воды, соотношение урожай–затраты (кг/денежная единица), соотношение суммарные затраты–использование воды (денежная единица/$м^3$), соотношение фиксированные (и переменные) затраты–использование воды (денежная единица/$м^3$), глубинная инфильтрация/угроза засоления ($м^3га^{-1}год^{-1}$), срезка почвы при планировке (см) и индекс эрозии почвы.

Анализы воздействий включают оценку урожайности сельхозкультуры, основанную на суммарном использовании воды в течение оросительно-

го сезона и принятие выбранной пользователем функции урожайности, связывающей относительную урожайность с относительной поливной нормой (рис. 10). Доступны три функции: квадратичная; функция с корректируемой ветвью снижения, когда пользователь выбирает параметр dw относительно отклонения квадратичной функции и функция подгонки, при которой пользователь описывает ветвь снижения табличными данными.

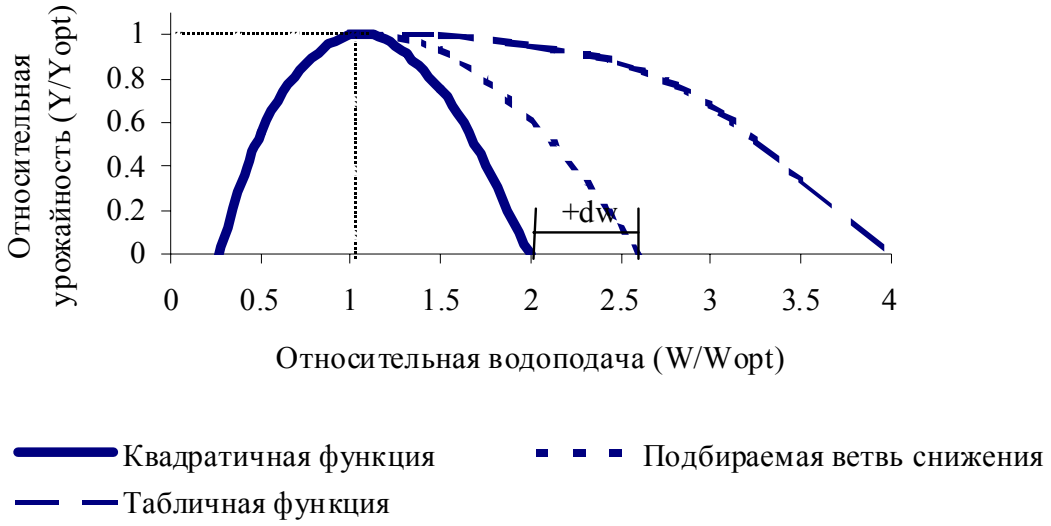


Рис. 10. Зависимость «вода–урожайность»

Многофакторный анализ для доходов и затрат использует линейные функции экономической выгоды и экологические критерии; весомость каждого критерия определяется пользователем, а величина генеральной выгоды для ранжирования альтернатив вычисляется при помощи метода линейного взвешивания.

В результате комбинации переменных проектирования программа генерирует большое количество альтернатив; однако, для пользователя становится весьма трудным просмотреть и проанализировать одну за другой существующие в базе данных альтернативы. В соответствии с этим обстоятельством, модель многофакторного анализа играет очень важную роль при автоматическом управлении большим количеством данных. Она сортирует альтернативы, удаляя неудовлетворительные и доминантные, выбирая наиболее соответствующие, объединяя их в группы и проекты.

Применение SADREG при бороздковых поливах хлопчатника в Ферганской долине

Сценарии усовершенствования полива

Полевые исследования и эксперименты проводились в Ферганской долине. Обе модели ISAREG и SIRMOD перед применением проверялись и параметризовались с использованием соответствующих данных полевых экспериментов и испытаний (Чолпанкулов и др., 2005; Хорст и др., 2005a, b). Типичные кривые инфильтрации для Центральной Ферганы идентифицированы в таблице 2 и показаны на рис. 11.

Таблица 2. Идентификация кривых инфильтрации для Центральной Ферганы

Классификация водопроницаемости почв	Поливы				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й и следующие
I (высокая)	F1	F2	F2	F3	F3
II (повышенная)	F1	F2	F3	F4	F4
III (средняя)	F2	F3	F3	F4	F4
IV (пониженная)	F2	F3	F3	F4	F5
V (низкая)	F2	F3	F4	F5	F5
VI (очень низкая)	F3	F4	F5	F5	F5

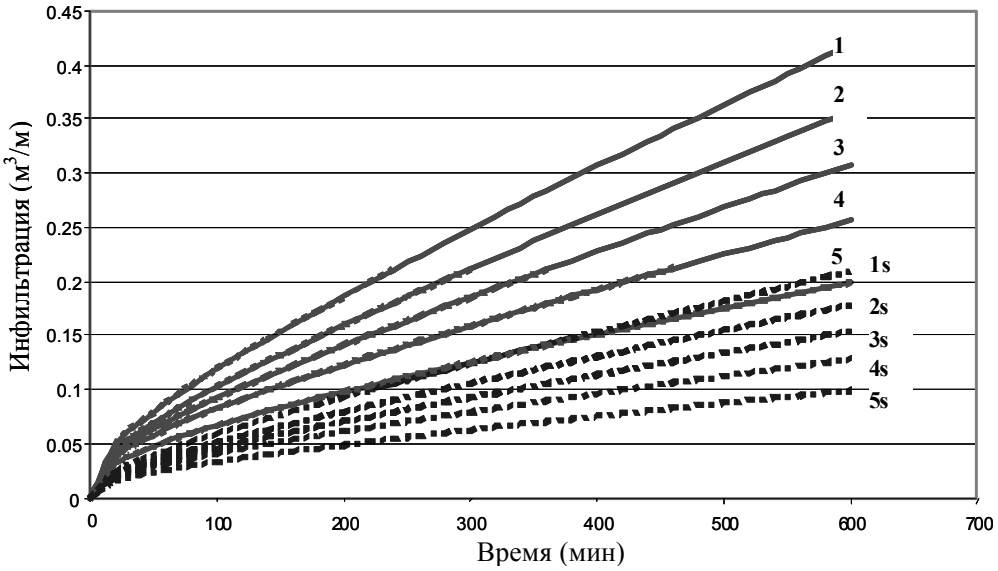


Рис.11. Кривые суммарной инфильтрации
при непрерывном (-----) и дискретном (- - -) поливах

Наиболее представительные типы полей в Ферганской долине имеют характеристики, приведенные в таблице 3. Для использования были отобраны 9 типичных полей или *“workspace”(«рабочих интервалов»)* (Wi, где

I = 1, 2,…, 9) с комбинированием размеров полей и классов водопроницаемости (таблица 4).

Таблица 3. Наиболее представительные типы полей

Размеры полей	Площадь (га)	Длина (м)	TAW* (мм/м)	Ширина (м)	Продольный уклон (%)
большое	20	400	150	500	0,25
среднее	10	400	150	250	0,25
малое	6	300	150	200	0,25

(*) Общий запас доступной растениям почвенной влаги.

Таблица 4. Рабочие пространства (Workspaces) для основных типов полей

Инфильтрация	Размеры полей		
	большое	среднее	малое
Высокая (I)	W4	W5	W6
Средняя (II)	W1	W2	W3
Низкая (III)	W7	W8	W9

Как указано в таблице 3, использовались следующие три размера полей:

- 6 га - 300 х 200 м с длиной 300 м
- 10 га- 400 х 250 м с длиной 400 м
- 20 га- 400 х 500 м с длиной 400м.

При сравнении между собой данных (таблица 3) для полей 6 га и 10 га, можно отметить их зависимость и от длины борозд (300 и 400 м) и от площади поля, в то же время сравнивая поля 10 и 20 га, можно отметить зависимость только от площади поля, т.к. борозды имеют одинаковую длину.

Многоярусный полив (Хорст и др., 2005а) имеет большой потенциал для повышения эффективности использования поливной нормы, в связи с этим рассматривается вариант подбора длины борозд. Однако, этот технологический прием относительно трудоемкий. Поскольку у SADREG нет ограничений на затраты труда, результаты, связанные с подбором длины борозд следует перед тем, как сделать окончательные выводы, тщательно просмотреть и проанализировать.

К полевым сценариям относятся постепенное осуществление улучшенных технических решений, связанных с графиком поливов, планировкой поверхности поля, управлением водоподачей и регулированием сброса. Каждый сценарий представляет шаг в процессе улучшений и соответствует объекту – “project”. Каждый “project” генерируется в SADREG пользователем путем выбора специфической комбинации переменных проектирова-

ния. К альтернативам, включаемым в каждый проект, относятся различные оперативные переменные, например, расход водоподачи и длительность полива. Сценарии (project) были созданы с учетом того, что хлопчатник является основной сельхозкультурой; они идентифицированы в таблице 5.

Таблица 5. Сводка проектов, рассматриваемых в процессе решения

Проект	Культура	График поливов	Расстояние между бороздами (м)	Планировка земель	Режим водоподачи	Условия
P0	хлопок	нынешний (переполив)	0,90	нет	постоянный	факт
P1	хлопок	MAD=0,4	0,90	нет	постоянный	новые**
P2	хлопок	оптимум	0,90	да	постоянный	новые
P3	хлопок	оптимум	1,80*	да	постоянный	новые
P4	хлопок	дефицит	0,90	да	постоянный	новые
P5	хлопок	дефицит	1,80*	да	постоянный	новые
P6	хлопок	оптимум	0,90	да	постоянный	новые
P7	хлопок	оптимум	1,80*	да	дискретный	новые
P8	хлопок	дефицит	0,90	да	дискретный	новые
P9	хлопок	дефицит	1,80*	да	дискретный	новые

(*) большая ширина междурядья обусловлена применением полива с чередованием поливаемых и сухих борозд
(**) к улучшению относится только сокращение длительности полива

Сценарий, относящийся к «нынешнему», описан проектом без всяких усовершенствований, следовательно, с фактическим графиком поливов, без планировки поверхности поля, при непрерывной водоподаче в борозды, однако, с хорошей организацией орошения, соответствуя таким образом потенциальным характеристикам нынешних систем орошения с графиком поливов без каких либо изменений. При создании улучшенных сценариев для Ферганской долины были рассмотрены факторы, перечисленные в таблице 6. Сценарии или проекты показаны в таблице 7.

Ранговый номер проектов связан с уровнем сложности системы, включая, ее управляемость. Применение дискретного, дефицитного и полива через борозды увеличивает возможность водосбережения, но более требовательно с позиции управления водопользованием.

При использовании SADREG для орошаемого сектора, требования на орошение и водораспределение, соответственно режиму орошения, для каждой сельхозкультуры и каждого типа почвы идентичны, следовательно, проекты отдельных полей типизируются с учетом принятого сценария водоподачи.

Таблица 6. Факторы улучшения полива

Технические аспекты	Уровни для генерации сценариев	Уровень изменений
1. Водоподача на поле	Фактический максимальный расход водовыпусков и их количество	нет изменений
2. Сельхозкультура	Хлопчатник	нет изменений
3. Водоподача в борозды	В каждую борозду (0,90 м) Через борозду (1,80 м)	a b
4. График поливов	Переполив (нынешний) Улучшенный (MAD=0,4) Оптимальный (MAD=0,6) Дефицитный (MAD=0,8)	a b c d
5. Режим водоподачи	Непрерывный Дискретный	a b
6. Распределение воды на поле	земляное русло гибкий шланг жесткий трубопровод	a b c
7. Подбор длины борозд	полная длина поля половина длины поля 1/3 длины поля	a b c
8. Управление концевым сбросом	сквозные борозды тупиковые борозды при помощи насоса	a b c

Таблица 7. Сценарии совершенствования орошения (проекты SADREG)

Сценарии (проекты)	Факторы планируемых улучшений и соответствующие уровни совершенствования*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
P0	n.c.	n.c.	a	a	a	a	a	a
P1	n.c.	n.c.	a	b	a	a	a	a
P2	n.c.	n.c.	a	c	a	a, b,c	a, b,c	a, b,c
P3	n.c.	n.c.	b	c	a	a, b,c	a, b,c	a, b,c
P4	n.c.	n.c.	a	d	a	a, b,c	a, b,c	a, b,c
P5	n.c.	n.c.	b	d	a	a, b,c	a, b,c	a, b,c
P6	n.c.	n.c.	a	c	b	a, b,c	a, b	a, b,c
P7	n.c.	n.c.	b	c	b	a, b,c	a, b	a, b,c
P8	n.c.	n.c.	a	d	b	a, b,c	a, b	a, b,c
P9	n.c.	n.c.	b	d	b	a, b,c	a, b	a, b,c

*уровни a,b, и c (таблица 6) для факторов 6-8 зависят от полевых характеристик.

Обозначение n.c. показывает, что факторы улучшения не рассматривались.

Решение, создающее приоритеты

Специалист, принимающий решения, может выразить свои предпочтения и приоритеты для ранжирования и выбора альтернативных проектов через веса, присвоенные каждому критерию. Среди всех возможных сочетаний весов, веса, рассматриваемые в этом исследовании, перечислены в таблице 8.

Таблица 8. Типы приоритетов специалиста, принимающего решения (веса в %)

Критерии	Атрибуты	Типы приоритетов		
		соразмерные	требования экологии и водосбережения	экономическая выгода
Выгоды	Физическая продуктивность использования земли	6	3	7
	Экономическая продуктивность использования земли	5	3	7
	Физическая продуктивность использования воды	6	4	6
	Экономическая продуктивность использования воды	5	3	7
	Коэффициент полезного использования воды	6	4	6
	Соотношение урожайность-суммарные затраты	6	3	7
	Итого	**34**	**20**	**40**
Затраты	Суммарные затраты на водопользование	11	6	14
	Фиксированные затраты на водопользование	11	7	13
	Переменные затраты на водопользование	11	7	13
	Итого	**33**	**20**	**40**
Влияние на экологию	Суммарное водопотребление	7	20	4
	Коэффициент сброса	7	15	4
	Риск засоления	6	15	4
	Воздействие планировки	6	5	4
	Индекс эрозии почвы	7	5	4
	Итого	**33**	**60**	**20**

При установлении типа приоритетности сочетаний, приведенных в таблице 8, используются следующие критерии:

1. *Балансирование экономических выгод и экологических требований*, когда всем группам критериев (выгоды, затраты, влияние на экологию) приписываются равные веса;
2. *Приоритет требований экологии и водосбережения*, когда большее значение придается критериям, связанным с воздействием на окружающую среду, в основном, водопотреблению;
3. *Приоритет экономической выгоды*, когда высокие веса присваиваются рентабельности.

Для проведения дальнейшего анализа чувствительности в процедуре принятия решений использовались упомянутые три различных типа приоритетов.

Эксплуатационные характеристики

При анализе результатов рассматривались следующие эксплуатационные характеристики:

- *Продуктивность использования земли* (LP) – это количество урожая (хлопчатника) на единицу площади (кг га$^{-1}$), выражающее характеристику полива с точки зрения урожайности
- *Продуктивность использования воды* (WP) – этот показатель выражает урожай на единицу объема оросительной воды (кг м$^{-3}$); это очень важный фактор для оценки характеристик полива, относящихся к затратам воды, при недостатке и дороговизне этого фактора
- *Суммарные затраты на воду* (TWC) – это суммарные затраты, относящиеся к орошению (€ га$^{-1}$)
- *Суммарное водопотребление* (TWU) – это годовой объем оросительной воды, поданный на единицу площади (мм)
- *Риск засоления* (SR) – это объем воды (мм), который глубоко просочился, влияя тем самым на потенциальную возможность засоления грунтовых вод
- *Общая выгодность (полезность)* (U) – это совокупная характеристика выгодности (полезности) альтернатив, зависимая от характеристики полива, веса критерия и функции полезности
- *Равномерность увлажнения* (DU) – это отношение между средним слоем воды, полученным на нижней четверти длины поля к среднему слою воды, полученному на всем поле (%)
- *Эффективность использования поливной нормы* (Ea) – это отношение между средним слоем воды, попавшей в корнеобитаемую зону ко всему слою воды, доставленному на поле (%).

Дальнейший анализ проводился соответственно следующей процедуре:

a) рассматривались наиболее представительные типы полей (*workspaces*) (таблица 4);
b) альтернативы генерировались для каждого типа поля (*workspace*) и сценария улучшений (*project*), как указано в таблицах 5-7;
c) эти альтернативы ранжировались соответственно трем типам приоритетов (веса критериев), определенных в таблице 8;
d) альтернатива, выбранная для каждого сценария улучшения (*project*) анализировалась, а ее отличительные свойства и показатели использовались для ее описания.

Длина поля подбиралась, как указывалось выше, в случае применения весов критерия, отражая баланс среди экономических и экологических воздействий (таблица 8). Подобранные длины перечислены в таблице 9 для каждого типа поля и альтернативного проекта. Длины борозд предполагались равными длине поля; вариант многоярусного полива (Horst *et al*., 2005a) был принят только для альтернативного проекта 6 на полях длиной 400 м.

Таблица 9. Длины полей, принятые для каждого типа поля (Wi) и альтернативного проекта (Pi)

Тип поля (workspaces)	Длина (м) поля (факт)	Подобранные длины полей (м) для проектных альтернатив									
		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
W1	400	400	200	200	400	200	400	200	200	200	200
W2	400	400	400	200	400	200	400	133	400	400	400
W3	300	300	300	300	300	300	300	150	300	300	300
W4	400	400	200	200	400	400	400	133	200	200	200
W5	400	400	400	200	400	200	200	133	400	400	400
W6	300	300	150	150	300	150	300	150	300	300	300
W7	400	400	400	400	400	400	400	200	400	400	400
W8	400	400	400	400	400	400	400	200	400	400	400
W9	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Результаты сравнения альтернативных сценариев бороздкового полива

Характеристики полива, связанные с размерами поля

Результаты, показанные ниже, были выбраны с целью оценки влияния размеров поля на характеристики полива, связанные с различными сценариями улучшения (*projects*); они описывают:

i. Поля, занятые хлопчатником, представленные почвогрунтами со средней водопроницаемостью (кривая 3 на рис. 11) и TAW = 150 мм/м, и имеющие продольный уклон = 0,25 %.

ii. Внутрихозяйственные приоритеты, представляющие баланс между экономическими и экологическими воздействиями.

Сезонное водопотребление

В сценарии нынешний ситуации P0 водопотребление выше в сравнении с улучшенными сценариями, включая простую подгонку длительности водоподачи в сценарии P1 (рис. 12).

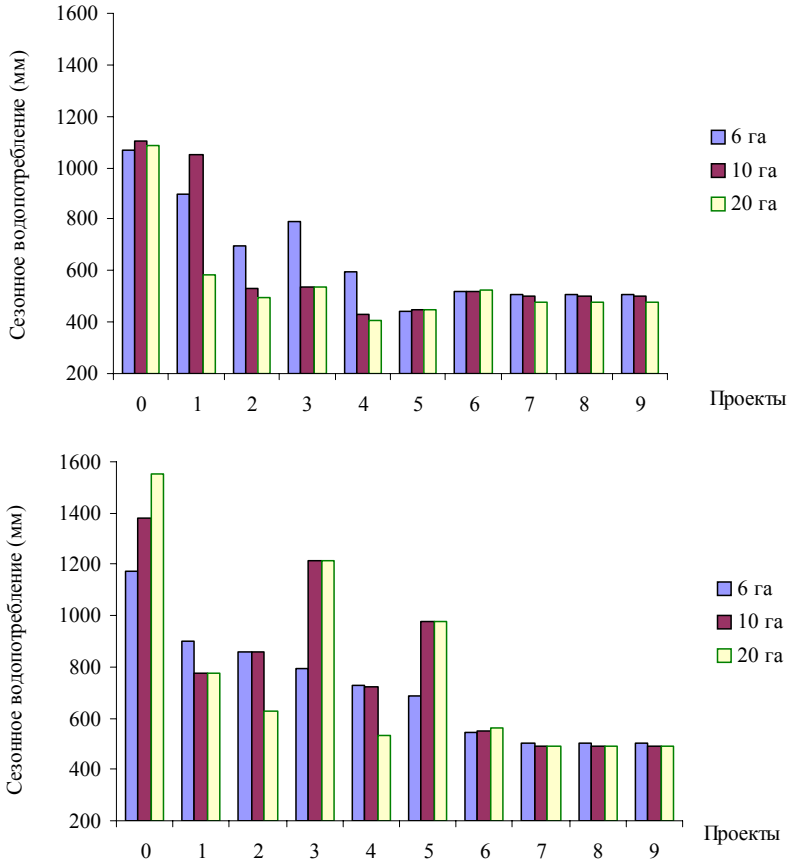


Рис.12. Зависимость сезонного водопотребления
от прогрессивных усовершенствований и размеров полей,
с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

При рассмотрении варианта подбора длины борозд (рис. 12a), аналогичное сезонное водопотребление прогнозируется для всех улучшенных решений с незначительно ухудшенными результатами для полей площадью 6 га. Для полей площадью 10 и 20 га в вариантах без подбора длины непрерывный полив в каждую борозду (P2 и P4) показывает характеристики лучше, чем непрерывный полив через борозду (P3 и P5), но для поля 6 га полив через борозду показывает несколько лучшие результаты, в сравнении с непрерывным поливом. Лучшие результаты наблюдаются при дискретном поливе, как в каждую борозду, так и через борозду.

Равномерность распределения увлажнения

Равномерность распределения увлажнения DU показывает очень хорошие результаты для всех проектов (рис. 13); следует отметить тенденцию к повышению DU, когда учитываются технические усовершенствования, и главным образом, при дискретном поливе (P6 и P9).

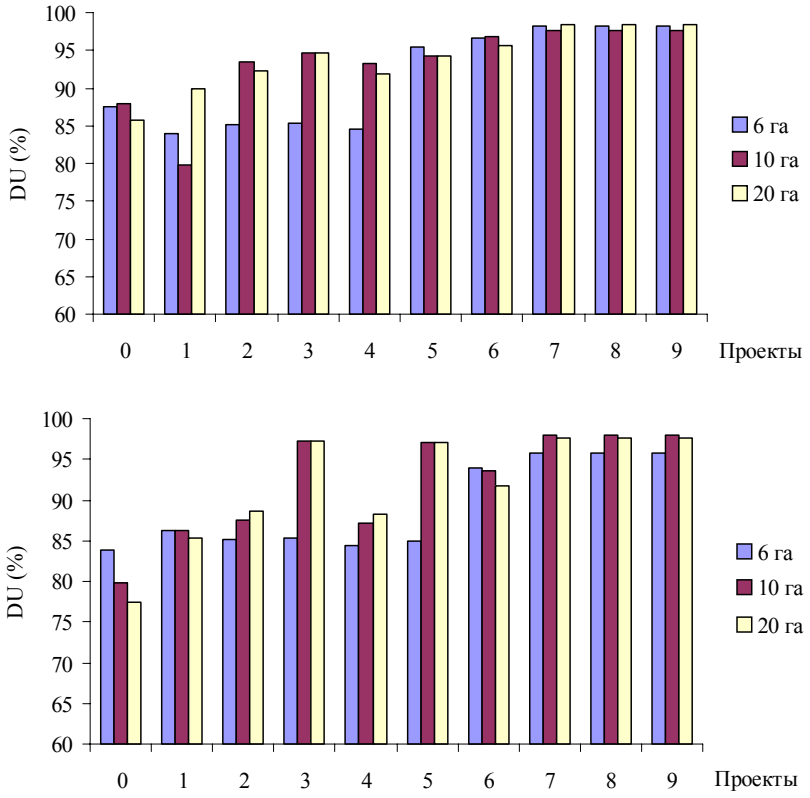


Рис.13. Зависимость равномерности увлажнения
от прогрессивных усовершенствований и размеров полей,
с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Результаты для DU аналогичны, как с подбором, так и без подбора длины борозд. Для полива через борозду P3 и P5 без подбора длины результаты, аналогичны проектам дискретного полива по длинным бороздам (400 м).

Эффективность использования поливной нормы

Для нынешнего сценария P0 эффективность использования поливной нормы показывает низкие результаты. Значения эффективности использования поливной нормы (Ea) (рис. 14) менее хороши, чем значения DU, но

примечательно, что лишь только за счет удачного подбора длительности полива Еа существенно возрастает относительно нынешнего сценария для всех сценариев, включая Р1. При сравнении непрерывного и дискретного полива для полей с подбором длины результаты аналогичны; однако, лучшие результаты показывают непрерывный полив в каждую борозду (Р2 и Р3) и дискретный полив в каждую борозду (Р6).

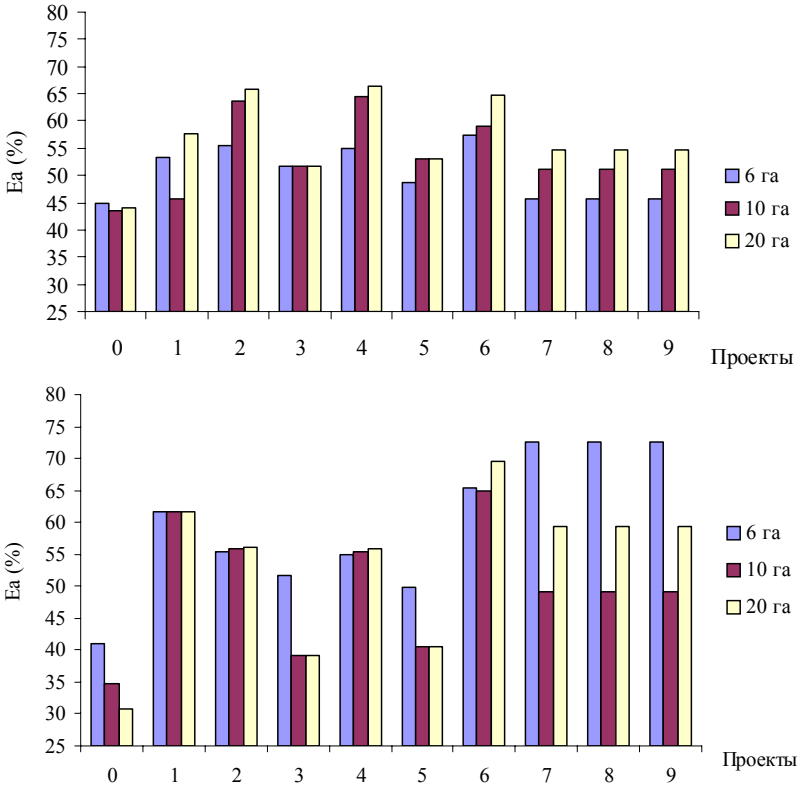


Рис.14. Зависимость эффективности использования поливной нормы от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Очевидно, что когда сохраняется фактическая длина, дискретный полив представляет самые высокие значения Еа. В этом случае поля меньших размеров (6 га) показывают лучшие результаты, в противовес вариантам с подбором длины. Р1 (непрерывный полив) показывает результаты, аналогичные дискретному поливу.

Глубинная фильтрация и риск засоления

Нынешний сценарий (Р0), главным образом, на больших полях без подбора длины поля, показывает высокий риск засоления, обусловленный большим объемом суммарной фильтрации.

Рисунок 15 показывает, что хорошее регулирование глубинной фильтрации достигается на дискретном поливе с подбором длины борозд или без него.

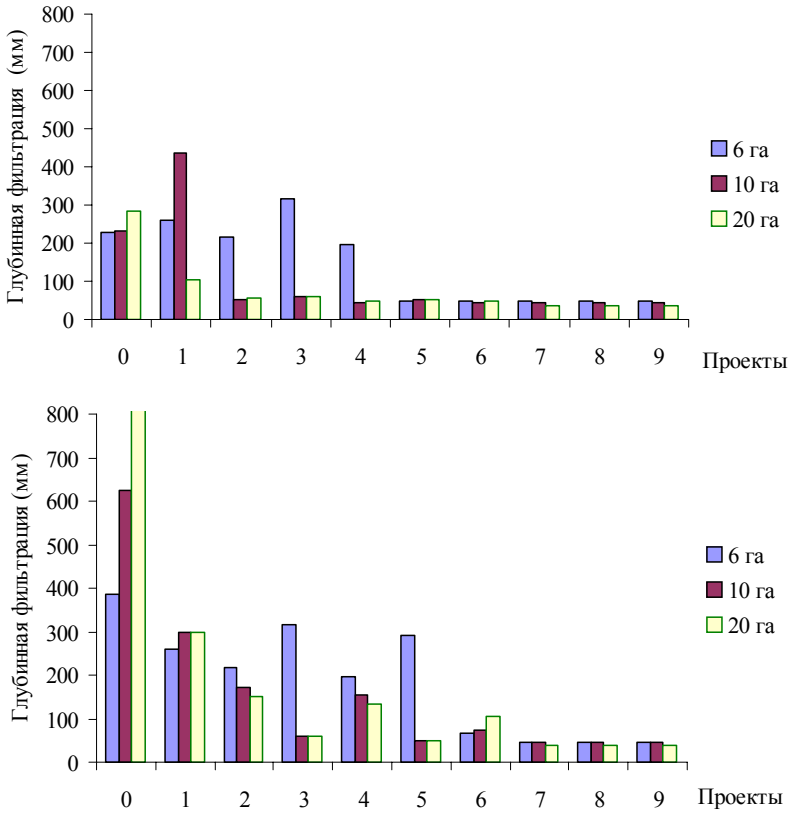


Рис.15. Зависимость суммарной глубинной фильтрации (риск засоления) от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

При непрерывном поливе наихудшие результаты получились для полей площадью 6 га.

Затраты на использование воды

При подборе длины борозд проекты P2 и P4 (непрерывный полив в каждую борозду) имеют несколько повышенные затраты (рис. 16), что обусловлено большими трудовыми затратами при многоярусном поливе.

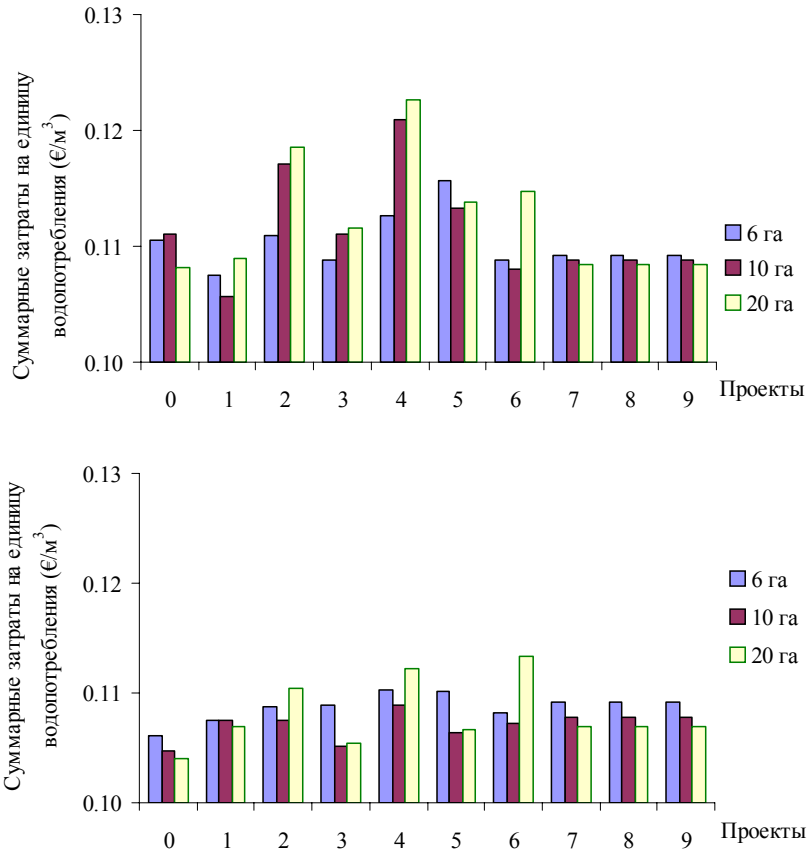


Рис.16. Зависимость суммарных затрат на единицу использованной воды от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Без подбора длины затраты показывают пониженную изменчивость для всех проектов, однако, ожидаются несколько повышенные затраты на дискретном поливе, что объясняется необходимостью капитальных затрат на клапан-переключатель и трубопроводы.

Продуктивность использования воды

При рассмотрении рис. 17, в варианте подбора длины, высокую продуктивность использования воды (WP) можно предвидеть для всех улучшенных решений с тенденцией к лучшим результатам при дискретном поливе. Этот факт связан с использованием при этом способе полива меньшего объема воды. Поля площадью 6 га представляют наименьшие значения WP при непрерывном поливе, но аналогичны другим, когда применяется дискретный полив (P6–P9). Наилучшие результаты соответствуют непрерывному поливу в каждую борозду (P4) и через борозду (P5).

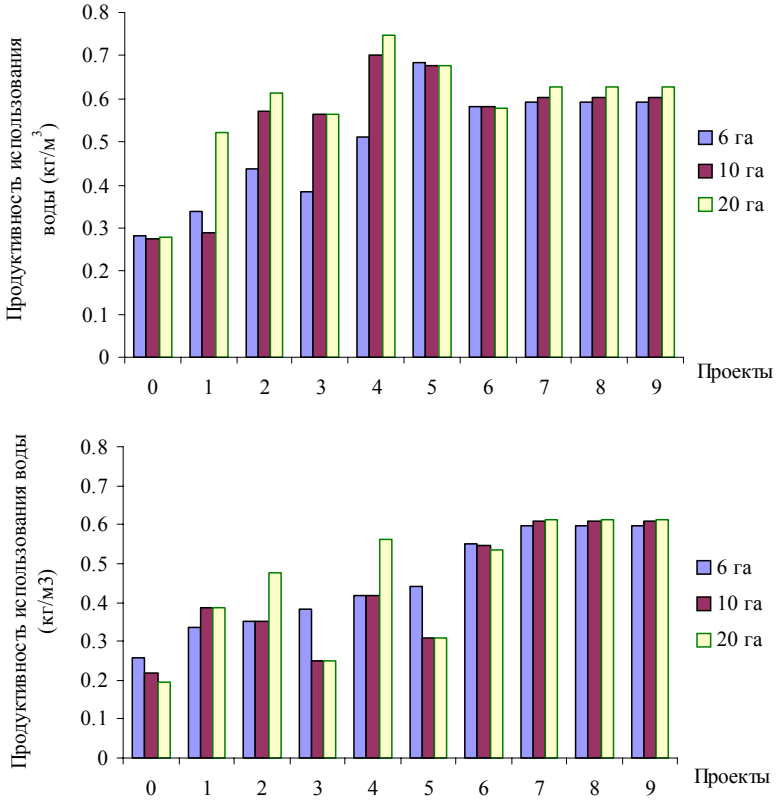


Рис.17. Зависимость продуктивности использования воды
от прогрессивных усовершенствований и размеров полей,
с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Лучшие результаты по WP соответствуют сценариям дискретного полива P6–P9 без подбора длины; это можно объяснить большей чувствительностью непрерывного полива к подбору длины борозд. Во всех случаях WP повышен относительно нынешнего сценария (P0).

Продуктивность использования земли

Результаты на рис. 18 показывают, что продуктивность использования земли (LP) не чувствительна к улучшениям орошения в хозяйстве. С одной стороны, предполагается, что приемы агротехники и сорта хлопчатника идентичны для всех сценариев и адекватны; с другой стороны, применяемый на практике в настоящее время переполив не приводит к заболачиванию и засолению, т. к. поля дренированы и дренажные системы работают должным образом. Кроме того, принятая стратегия дефицитного полива ведет к умеренному дефициту, который едва ли влияет на урожайность.

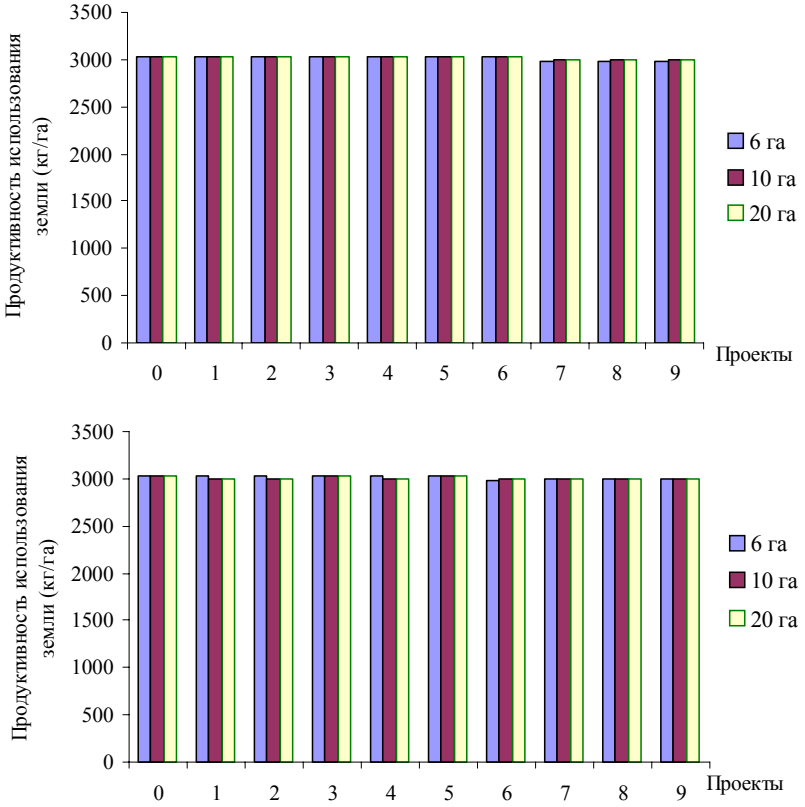


Рис.18. Зависимость продуктивности использования земли
от прогрессивных усовершенствований и размеров полей,
с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Характеристики полива в зависимости от характеристик инфильтрации

При анализе характеристик полива, зависимых от характеристик водопроницаемости почв, зафиксированы следующие условия:

i. Поля, занятые под хлопчатник, имеют средний размер (W2: 10 га, 400 x 250 м), TAW = 150 мм/м и продольный уклон = 0,25 %;
ii. На внутрихозяйственном уровне приоритеты относятся к балансу между экономическими и экологическими воздействиями.

Сезонное водопотребление

Самое высокое водопотреблении в проекте по сценарию P0 в противоположность улучшенным проектам.

Представленные на рис. 19 результаты показывают, что при варианте подбора длины борозд для всех улучшенных решений (P2-P9) существует аналогичное сезонное водопотребление, но оно слегка завышено на почвах с низкой водопроницаемостью, что обусловлено повышенным поверхност-

ным сбросом. Дискретный полив (Р6-Р9) в сравнении с непрерывным поливом в варианте без подбора длины борозд показывает лучшие результаты.

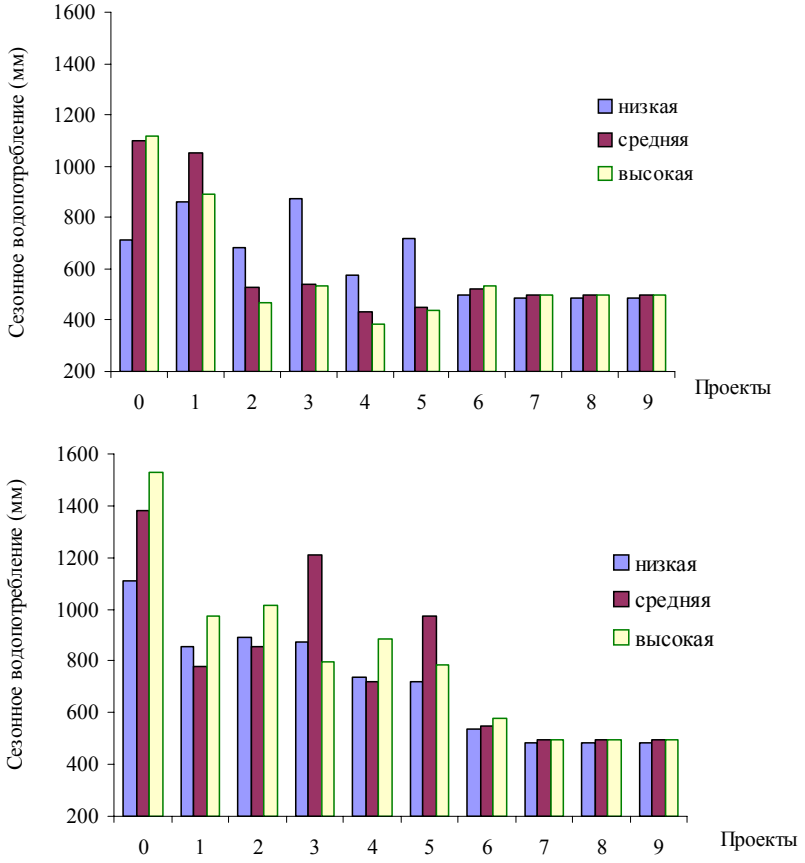


Рис.19. Зависимость сезонного водопотребления
от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв,
с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

При дискретном поливе сезонное водопотребление не зависит от водопроницаемости почв; но оно чувствительно к низкой водопроницаемости при непрерывном поливе в варианте с подбором длины борозд.

Равномерность распределения увлажнения

Равномерность распределения увлажнения представляет очень хорошие результаты для всех проектов, самые лучшие соответствуют проектам дискретного полива (рис. 20).

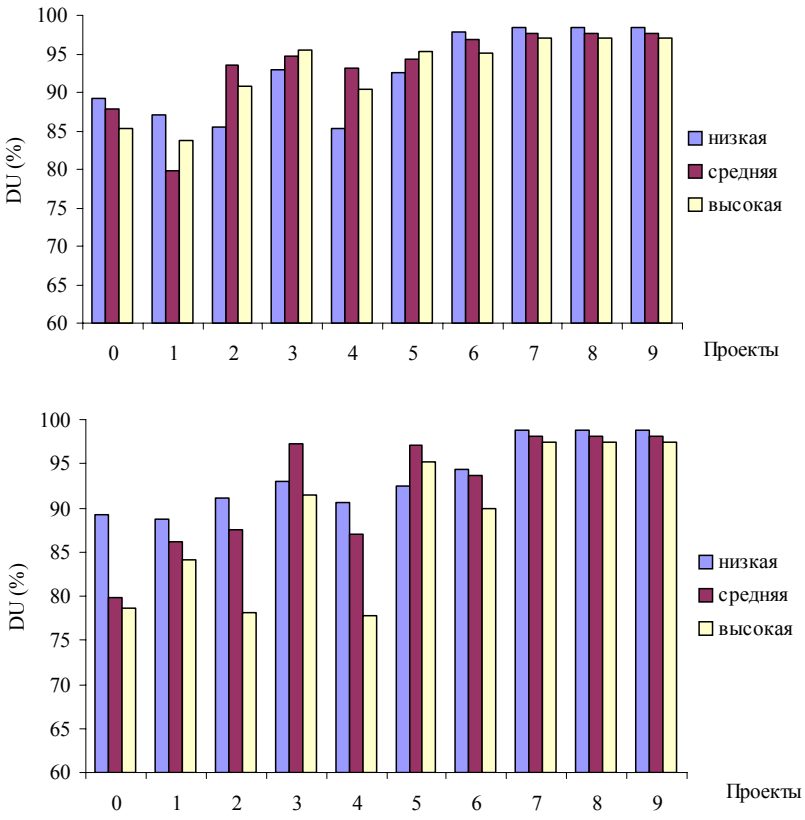


Рис. 20. Зависимость равномерности увлажнения
от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв,
с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Проекты полива через борозду P3 и P5 без подбора длины имеют результаты, аналогичные проекту дискретного полива. Самые низкие значения DU дает полив в каждую борозду при высокой водпроницаемости почв.

Эффективность использования поливной нормы

Эффективность использования поливной нормы в нынешнем сценарии P0 имеет невысокие значения и в варианте с подбором длины борозд не зависящие от характеристик инфильтрации.

Результаты на рис. 21 показывают, что значения Ea в варианте с подбором длины менее хороши, как можно было бы ожидать из значений DU. При сравнении непрерывного и дискретного полива в варианте с подбором длины борозд Ea дает аналогичные значения; однако, полив через борозду дает менее удачные значения, чем полив в каждую борозду. Лучшие результаты на почвах с высокой водопроницаемостью, а худшие – с низкой водопроницаемостью, что обусловлено поверхностным сбросом.

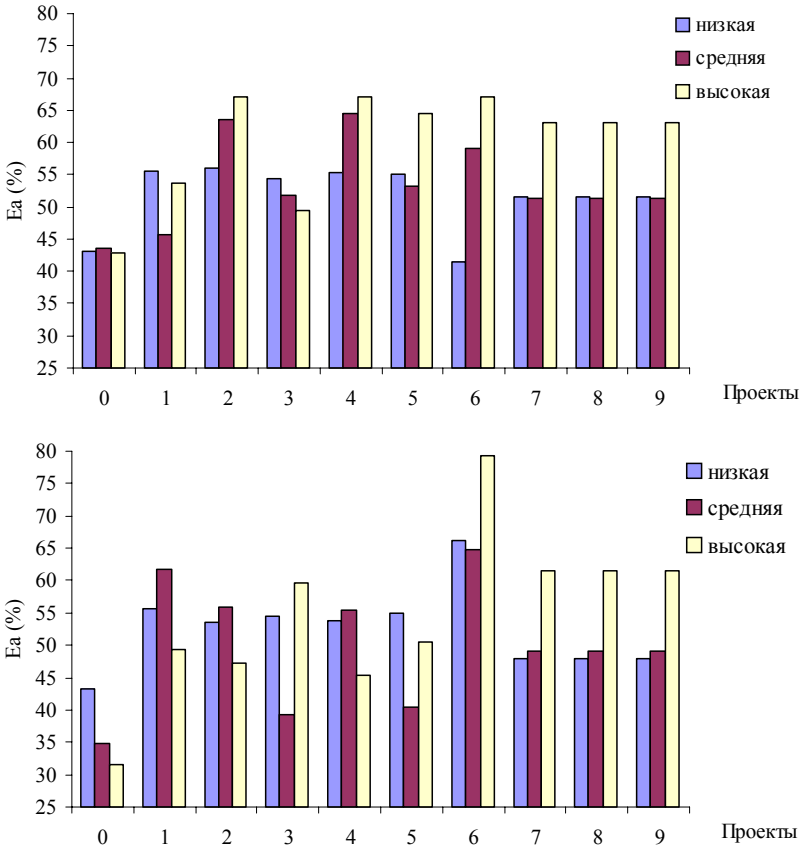


Рис.21. Зависимость эффективности использования поливной нормы от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Сценарий дискретного полива при сохранении существующей длины борозд, представляет самые высокие значения Ea, особенно для почв с высокой водопроницаемостью, на фоне которой дискретный полив значительно более эффективен, чем другие способы. Наилучшие результаты можно предвидеть для дискретного полива в каждую борозду.

Глубинная фильтрация и риск засоления

Для нынешнего сценария P0 при сохранении существующей длины борозд отмечается большой объем глубинной фильтрации и соответственно риск засоления, в основном, для почв с высокой инфильтрацией. Для всех случаев и во всех рассматриваемых сценариях эта ситуация улучшается, главным образом тогда, когда подобраны длины борозд (рис. 22a). Однако, глубинная фильтрация остается высокой при непрерывном поливе и при поливе в каждую борозду (P1, P2 и P4) на почвах с высокой водопроницаемостью и при существующей длине борозд.

Глубинная фильтрация хорошо регулируется при непрерывном поливе через борозду (Р3 и Р5). Тем не менее, наилучшие результаты достигнуты при дискретном поливе, как с подбором длины борозд, так и без него (рис. 22).

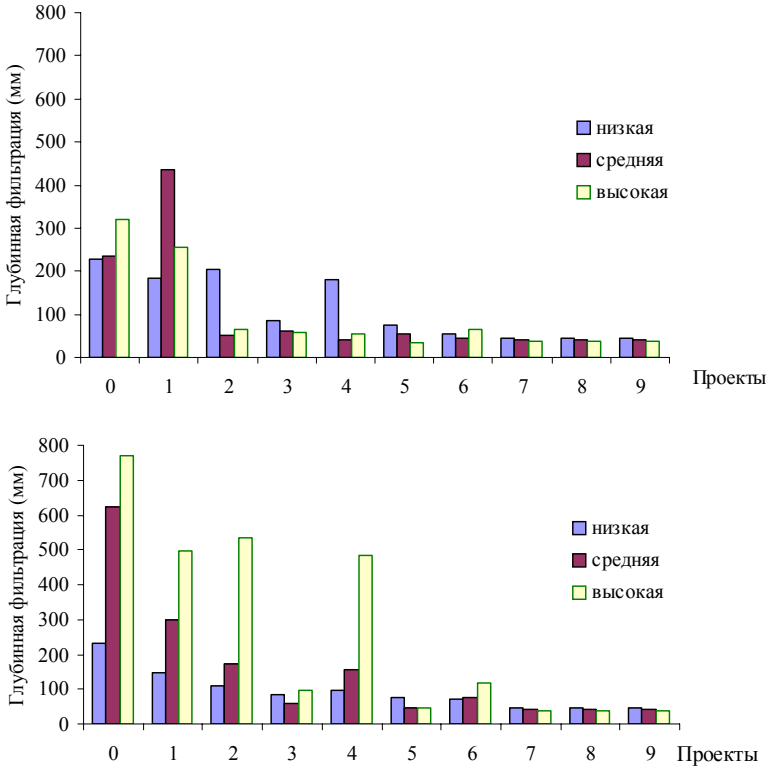


Рис.22. Зависимость глубинной фильтрации (риск засоления) от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Затраты на использование воды

Суммарные затраты на использование воды менее зависимы от водопроницаемости почвы, но имеют тенденцию к росту на почвах с высокой водопроницаемостью в варианте подбора длины борозд и при непрерывном поливе в каждую борозду. Проекты Р4 и Р5 (дефицитный полив) в варианте подбора длины имеют несколько повышенные затраты на почвах с высокой водопроницаемостью, что обусловлено короткими бороздами, обустройство которых трудоемко.

Для всех проектов при сохранении фактической длины борозд (рис. 23b) затраты на использование воды имеют пониженную изменчивость.

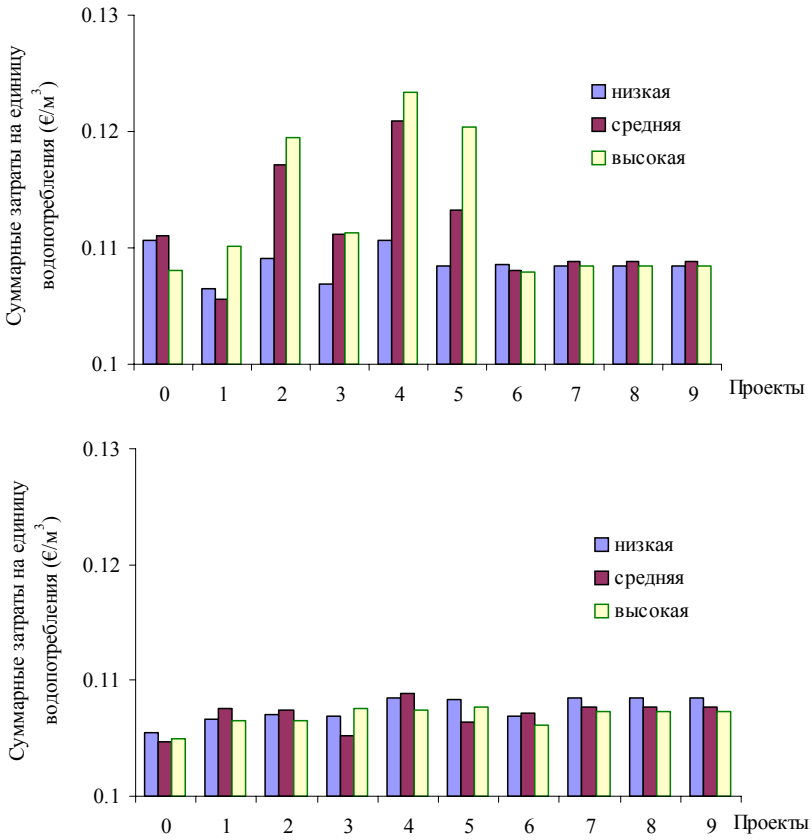


Рис.23. Зависимость суммарных затрат на использование воды от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Продуктивность использования воды

Нынешний WP, как отмечалось ранее, очень низкий, но существенно возрастает, если осуществляются улучшенные сценарии.

В варианте подбора длины худшие результаты получены для почв с низкой водопроницаемостью (рис. 24), что обусловлено высоким поверхностным сбросом. В противоположность этому, наилучшие результаты при непрерывном поливе в каждую борозду (P2 и P4) соответствуют почвам с высокой водопроницаемостью, что связано с лучшим регулированием поверхностного сброса и инфильтрации на относительно коротких (200 м) полях. Дискретный полив (P6-P9) показывает хорошие результаты для всех трех классов водопроницаемости, как при поливе в каждую борозду, так и через борозду.

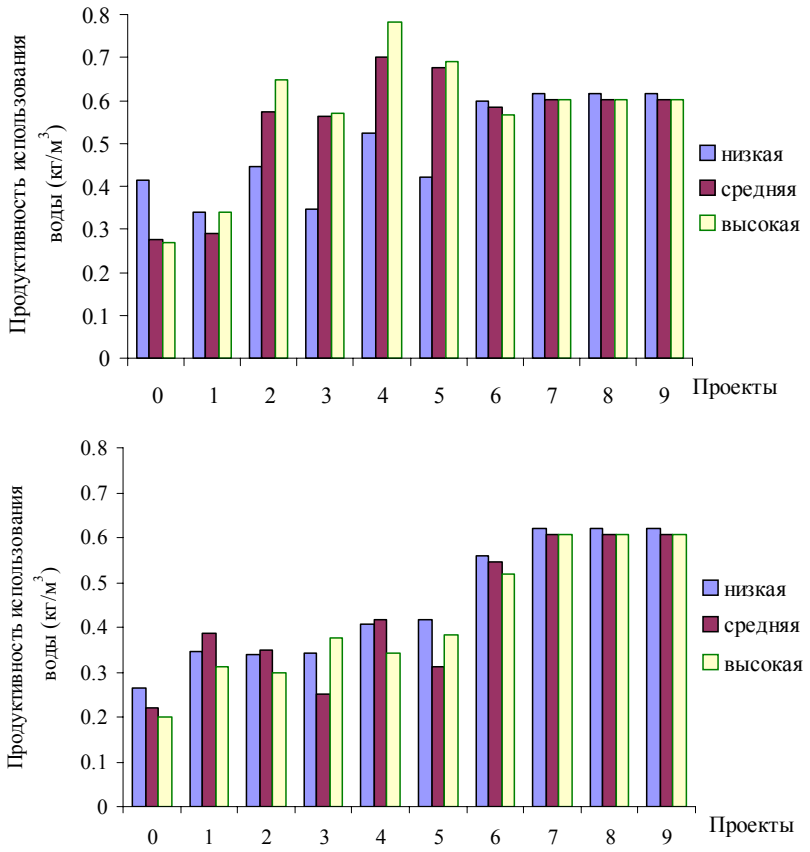


Рис.24. Зависимость продуктивности использования воды от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Наивысший показатель WP независимо от водопроницаемости при дискретном поливе в варианте с существующей длиной борозд, с увеличением до 0,6 кг/м^3 относительно 0,3-0,4 кг/м^3 на непрерывном поливе.

Продуктивность использования земли

Результаты различных проектов не показывают существенных отличий показателя LP, за исключением сценариев P0 и P1 для почв с низкой водопроницаемостью, где небольшое снижение LP обусловлено заболачиванием (рис. 25). Результаты вариантов с подбором длин и без него аналогичны, что объясняется тем фактом, что приемы агротехники идентичны для всех сценариев, а дефицитный полив довольно умеренный, что незначительно влияет на урожайность.

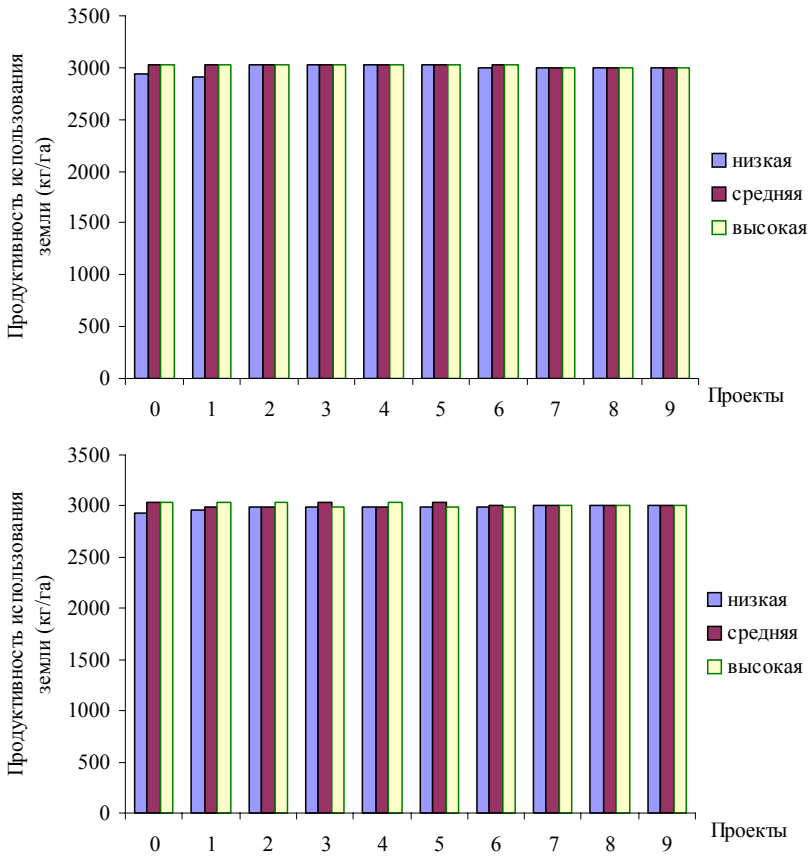


Рис.25. Зависимость продуктивности использования земли от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Анализ глобальной полезности

Принятый тип приоритетности при анализе глобальной полезности относительно рассматриваемых сценариев – это баланс между экономическими и экологическими проблемами. Фоном приведенного далее анализа для 10 га полей (W2) являлась только водопроницаемость.

Результаты показывают (рис. 26), что значения глобальной полезности U повышаются от нынешних условий к усовершенствованным с, как правило, высокими значениями при дискретном поливе.

Наилучшие результаты получены для дискретного полива (P6-P9) при подборе длины, в первую очередь для почв с низкой водопроницаемостью, и во вторую – с высокой.

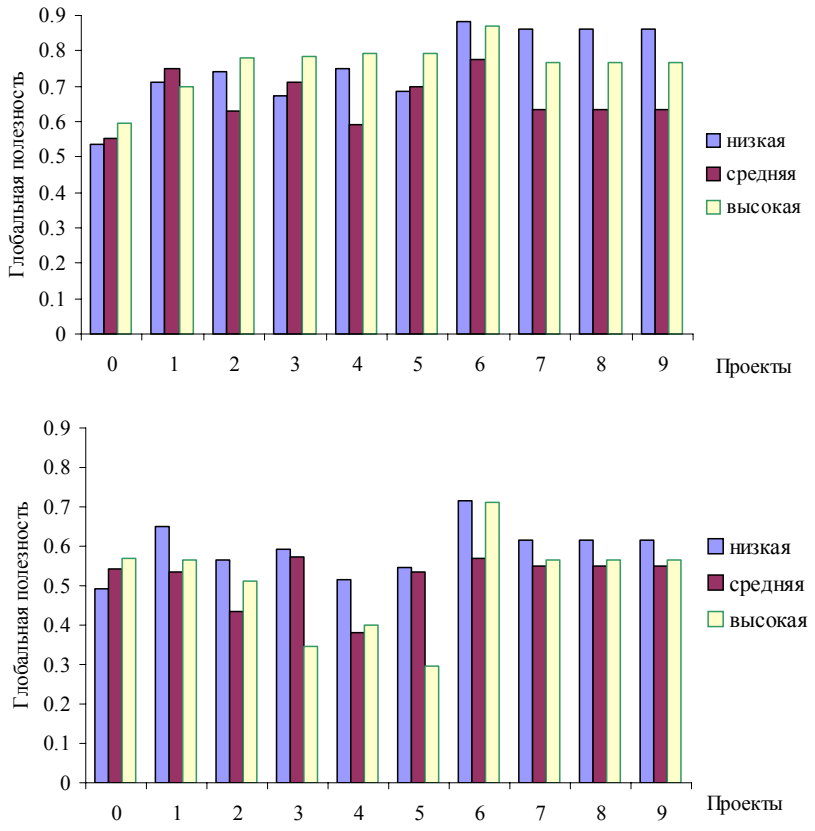


Рис.26. Зависимость глобальной полезности от степени совершенства сценариев и водопроницаемости почв для полей площадью 10 га (W2), с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Анализ чувствительности к критериям приоритетности

При анализе чувствительности зависимости изменения глобальной полезности проектов под воздействием принятых критериев приоритетности (таблица 8), установлены следующие условия:

i. средняя инфильтрация
ii. средний размер полей (W2: 10 га, 400 x 250 м)

Результаты на рис. 27 показывают, что нынешняя система (P0) имеет наихудшие результаты в сравнении с P1 (нынешняя система, но с улучшенной длительностью водоподачи) и с улучшенными сценариями (P2-P9). Наилучшие результаты – у сценариев P5 и P6 в варианте с подбором длин борозд и дискретном поливе при сохранении фактической длины борозд.

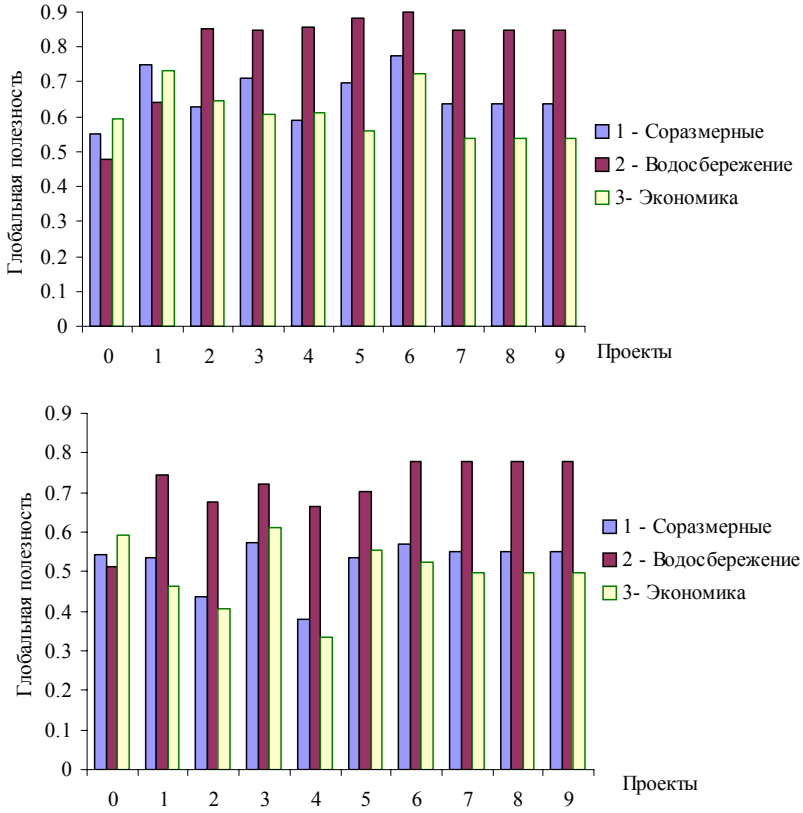


Рис. 27. Зависимость глобальной полезности проектов от критериев приоритетности, с подбором длины борозд (a, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

Высокие значения показателя U получены, когда приоритетными установлены водосбережение и воздействие на окружающую среду. Напротив, U меньше при приоритетах, диктуемых экономическими проблемами. Результаты незначительно разнятся при паритете между экономическими и экологическими проблемами.

Выводы и вопросы будущих исследований

Применение SADREG к конкретным исследованиям в Ферганской долине, Узбекистан, где полив по бороздам является преобладающим, признано успешным. К трудностям расширения использования модели на другие области относятся потребность в базовых проектных расчетах, основанных на тестируемых в полевых условиях переменных и параметрах и необходимость соответствующей базы данных.

Оценивая улучшенные сценарии (*Projects* P2-P9), были сделаны следующие выводы: дискретный полив (P6-P9) ведет к меньшему водопотреблению, в частности, для борозд полной длины, непрерывный полив в каждую борозду (P2 и P4) показывает водопотребление более близкое к дискретному поливу, чем непрерывный полив через борозду (P3 и P5). Дискретный полив характеризуется высокой продуктивностью использования

воды (кг $м^{-3}$) и менее чувствителен к водопроницаемости почв; кроме того, он демонстрирует лучшие возможности регулирования глубинной фильтрации, что дает ему большие преимущества в контексте предотвращения засоления грунтовых вод.

Характеристики проектов/сценариев весьма чувствительны к критериям приоритетности. Это обстоятельство подтверждает важность компетентного построения типов приоритетов специалистом, принимающим решения. В большинстве случаев, различия глобальной полезности между непрерывным поливом и дискретным не выражены. Но, когда главными приоритетами в хозяйстве становятся водосбережение и контроль над засолением грунтовых вод, дискретный полив представляется более эффективным. Дискретный полив имеет больший потенциал для повышения продуктивности использования воды, поддерживая тем самым эталон экономических характеристик системы (продуктивность использования земли и затраты).

Применение системы принятия решений (DSS), представленное в этой статье, показывает применимость этого подхода в практике проектирования. Во-первых, DSS дает возможность целесообразной генерации, оценки и ранжирования проектных альтернатив. Во-вторых, альтернативы проектирования более легко ассоциируются с неотъемлемыми свойствами технического, экономического и экологического характера, что дает возможность соответствующего диалога между проектировщиком и пользователем. В-третьих, ранжирование определяется при помощи многофакторного анализа, а критерии взвешиваются согласно перспективам, устанавливаемым проектировщиком и пользователями. В-четвертых, в процессе работы, DSS обеспечивает обучение специалиста, принимающего решения. Перечисленные аспекты являются очевидными преимуществами при использовании DSS в проектировании поверхностного полива.

Применение DSS в Узбекистане также показывает, что осуществимость DSS в значительной мере зависит от соответствия требованиям исходных данных. Это подтверждает тот факт, что при использовании более усложненных подходов, качество проектирования продолжает существенно зависеть от доступности соответствующих полевых данных. Иными словами, хороший метод моделирования не может заменить недостаток отвечающих требованиям полевых данных.

Библиография

Гонсалвес Дж.М., Матеус Р., Кампос А.А., Муга А.Р., 2005. Моделирование требований на орошение и водораспределение: модель DSS SEDAM (в этой книге).

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 этой книге).

Хорст М.Г., Шамуталов Ш.Ш., Гонсалвес Дж.М., Перейра Л.С. 2005b. Дискретный полив как способ водосбережения (в этой книге).

Чолпанкулов Э.Дж., Инченкова О.П., Паредес П., Перейра Л.С. 2005. Тестирование модели составления графика поливов ISAREG для хлопчаника и озимой пшеницы в Центральной Азии (в этой книге)

Gonçalves JM, Pereira LS, 1999. Design of sustainable on-farm surface irrigation systems with a decision support system. In: Musy A, Pereira LS and Fritsch M (eds.) Emerging Technologies for Sustainable Land Use and Water Management, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne: CD-ROM Paper 8.10.

Gonçalves JM, Pereira LS, Sousa PL, 1998.. Decision support system for surface irrigation design. In: Zazueta FS and Xin JN (eds.) *Computers in Agriculture 1998* (Proc. Int. Conf., Orlando, Florida); ASAE, St. Joseph, MI: 138-145.

Horst M.G., Shamutalov Sh.S., Pereira L.S., Gonçalves J.M., 2005a. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. Agric. Water Manage. 77: 210-231.

ISED, 1989. SIRMOD, Surface Irrigation Simulation Software. User's Guide. Irrig. Software Engng. Div., Dep. Agric. Irrig. Engng., Utah St. Univ., Logan.

Глава 19.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ НА ОРОШЕНИЕ И ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ: МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ (DSS) SEDAM

Дж.М. Гонсалвес[32], А. Муга[32], П. Матеус[32], А.А. Кампос[32]

Реферат: Модель SEDAM (**se**ctor **d**emand **a**nd distribution **m**odel – модель спроса и распределения) является средством поддержки решений, разработанным для поиска и оценки лучших сценариев при планировании различных сочетаний совершенствования внутрихозяйственных и распределительных систем в районах поверхностного орошения. SEDAM моделирует спрос и распределение воды на уровне Сектора и объединяет результаты на

[32] Agricultural Engineering Research Center, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal. E-mail: lspereira@isa.utl.pt

уровне района. Она работает с базой данных ГИС в сочетании с моделью расчета графика поливов ISAREG и моделью DSS для поверхностного полива SADREG (описанной в сопутствующей статье). SEDAM включает модуль многофакторного анализа, который помогает пользователям, главным образом, менеджерам оросительных систем, формулировать и оценивать альтернативы в соответствии с выбранными пользователем предпочтениями, экономическими и экологическими критериями. Они включают в себя продуктивность использования земли и воды, доходы фермеров, водосбережение и воздействие орошения на окружающую среду. Модель создает сценарии, основанные на действиях системы управления, относящихся к водоподаче и внутрихозяйственной оросительной системе. Каждый сценарий отражает набор мер, соответствующих стратегии усовершенствований, планируемой на уровне сектора, к которым относятся совершенствование деятельности на внутрихозяйственном уровне – график поливов, планировка земель, внутрихозяйственное водораспределение, или регулирование расходов водоподачи, а на уровне подачи воды в сектор – расходы водоподачи выше по течению, правила водоподачи и срок водоподачи. В модели водоподачи из сети каналов-распределителей используется упрощенный объемный баланс, а расчеты включают оценку фильтрации и сброса из каналов, а также определение времени, требуемого для достижения потоком установившегося режима течения. Поля группируются пользователем и в соответствии со структурой посевов сельхозкультур принимается схема водооборота. Шаг по времени при расчетах принимается равным 10 суткам. Результаты затрагивают как внутрихозяйственные, так и межхозяйственные усовершенствования и могут через базу GIS быть доступны в пространственно распределенных форматах. Эта статья описывает модель и показывает результаты ее применения в орошаемом районе Ферганской долины в Центральной Азии.

Ключевые слова: поверхностное орошение, модернизация и усовершенствование орошения, системы поддержки решения, гидрографы спроса и водоподачи.

Введение

Оросительные системы коллективного пользования сложны при планировании и управлении. Ограничениями распределительных систем, являются такие как нехватка воды, пропускная способность оросительной сети и водорегулирующих устройств, условия водоподачи как на уровне поля, так и на внутрихозяйственном уровне. Все это требует более тщательно разработанных технических решений и более совершенного процесса их принятия, когда ответственность разделяют многие лица, участвующие в принятии решения (ассоциативные органы управления и фермеры). Ис-

пользуя методологию системы поддержки решений (DSS) можно эффективно улучшить процесс принятия решений.

DSS является интегрированным подходом к решению сложных проблем, сочетающим компьютерные расчеты и возможности аккумуляции данных с человеческими знаниями и восприятием и поддержанием математического моделирования, помогая лицам, принимающим решения, идентифицировать проблемы, создавать альтернативы, оценивать и выбирать их. Признано, что DSS совершенствует качество процесса принятия решений с более быстрым и полным доступом к данным, интегрируемым с моделями, и оценку большого количества альтернатив. Оно дает активное средство, способствующее информированности и обсуждениям ситуаций между различными лицами, участвующими в процессе принятия решения.

Многокритериальная методология является весьма полезной для содействия лицам, принимающим решения, при оценке и выборе задач, а именно экологических проблем, где в принятии решений ключевую роль играет компромисс между издержками и воздействиями на окружающую среду (Manoliadis, 2001). Эта методология принимает во внимание различные точки зрения, присущие решаемой проблеме, некоторые из них противоречат друг другу или конфликтуют и требуют, чтобы лицо, принимающее решение, ясно выразило свои предпочтения и приоритеты. Многокритериальная оптимизация преследует цель достижения лучшего компромисса между различными интересами или точками зрения (Roy & Bouyssou, 1993). Многокритериальный анализ может быть интегрирован в структуру DSS, улучшая процесс обучения и помогая взаимодействию с пользователем. Усовершенствование внутрихозяйственных оросительных систем в больших проектах поверхностного орошения хорошо поддерживается средствами DSS, если есть доступ к GIS (Malazewski, 1999) , их можно применять как на уровне поля, так и на уровне района. В этой статье описывается конкретное исследование интегрированного моделирования орошения, с использованием многокритериального анализа в структуре DSS с пространственно распределенными данными.

Модели и данные

SEDAM – это DSS, нацеленная на моделирование и оценку спроса на воду и водоподачу в масштабе *сектора орошения* для проектирования целей и ранжирования альтернативных сценариев, взаимосвязанных, как с хозяйством, так и с оросительными системами поверхностного орошения (сектор – это площадь, обслуживаемая веткой канала и соответствующими распределителями). Модель задумана, как вспомогательное средство для менеджеров оросительных систем, с тем, чтобы они смогли сформулировать и оценить вопросы развития, нацеленные на достижение устойчивых сельхозпроизводства, земле- и водопользования при бережном отношении к среде обитания. Среди прочих, эти вопросы включают водосбережение, ох-

рану и правильное использование почв, и повышение урожайности сельхозкультур и доходов фермеров. Модель создает сценарии, основанные на действиях по управлению системой, взаимосвязанных с системой водоподачи и внутрихозяйственными системами орошения (Gonçalves *et al*., 2003; 2004). Каждый сценарий отражает набор мер и приемов, требуемых для осуществления стратегии управления при планировании водопользования на уровне Сектора, т.е. соответствующей площади, управляемой Ассоциацией водопользователей (АВП). Это дает возможность оценки воздействий, обусловленных осуществлением каждого сценария, таким образом, различные сценарии сектора можно сравнить и ранжировать через многокритериальный анализ. К выходным результатам относятся сетевой график, гидрографы спроса и водоподачи с шагом 10 суток и показатели характеристик полей и сектора.

SEDAM объединяет несколько моделей и баз данных (рис. 1). Для формирования графиков полива сельхозкультур и моделирования требований на орошение на внутрихозяйственном уровне применяется GISAREG (Fortes *et al*., 2005a, Фортес и др. 2005b); а для создания альтернатив поверхностного орошения на внутрихозяйственном уровне используется DSS SADREG (Gonçalves *et al*., 2005) с интерактивной процедурой при оптимизационном поиске, основанном на многокритериальной методологии.

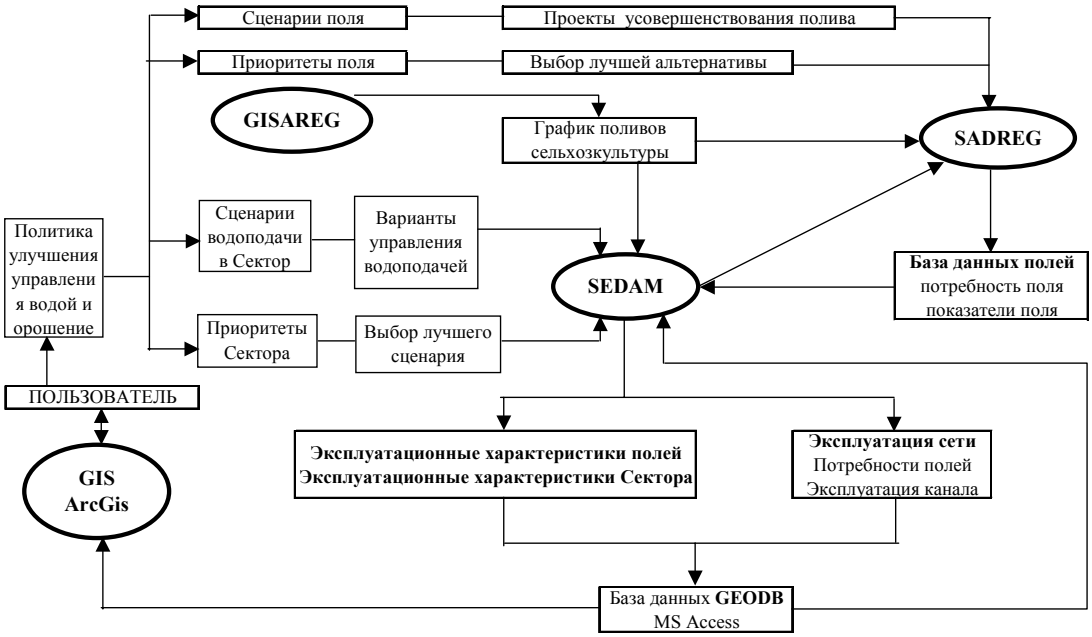


Рис.1. Интеграция моделей SEDAM и базы данных

Сеть каналов-распределителей моделируется с использованием объемного баланса, при котором геометрические и гидравлические характеристики согласовываются с водорегулирующими устройствами, правилами водораспределения и гидравлическими ограничениями. Этот подход включает в себя расчет начального времени, требуемого для достижения установившегося режима потока, фильтрации из канала, если канал необлицованный, и сброса нераспределенной воды. Для водоподачи поля группируются в соответствии с правами фермеров на водопользование и характеристиками каналов-распределителей и участковых оросителей. Схема водооборота рассматривается в соответствии со структурой посевов.

В базе данных SEDAM сохраняются в виде таблиц, следуя соответствующей концепции, все входные, выходные и внутренние данные. База данных GEODB создана в MS Access, а проверяется ArcGIS; таким образом, сохраняются пространственные и непространственные данные. Рабочее пространство базы данных SADREG (Гонсалвес *и др.*, 2005) хранит информацию о полях, в частности, альтернативы проектирования усовершенствований полива, соответственно полевым сценариям (рабочее пространство – это набор систематизированных данных, характеризующих каждое поле). База данных GISAREG (Fortes *et al*., 2005a, Фортес и др. 2005b) хранит информацию о графике поливов для каждого поля и водоподаче на группу полей.

Сценарии улучшения управления поливами

Улучшение управления оросительной водой в масштабе АВП подразумевает принятие решений как на уровне системы поставки воды, так и на уровне хозяйства. SEDAM рассматривает данную проблему принятия решений, посредством построения, ранжирования и оценки сценариев, охватывающих широкий диапазон мер и приемов. Каждый сценарий представляет шаг к дальнейшему усовершенствованию оросительных систем, который последовательно может осуществляться в течение выбранного периода. Глобальная характеристика системы зависит от решений, взаимосвязанных с хозяйством и системами водоподачи/водораспределения. Однако, несмотря на то, что DSS способна обеспечивать более обоснованную поддержку процессу принятия решений, достижение желаемых результатов зависит от способности менеджеров содействовать участию фермеров в решении проблем и поддерживать их в осуществлении намеченных улучшений. Процедура оценки воздействий, соответствующих различным сценариям, изображена на рис. 2.

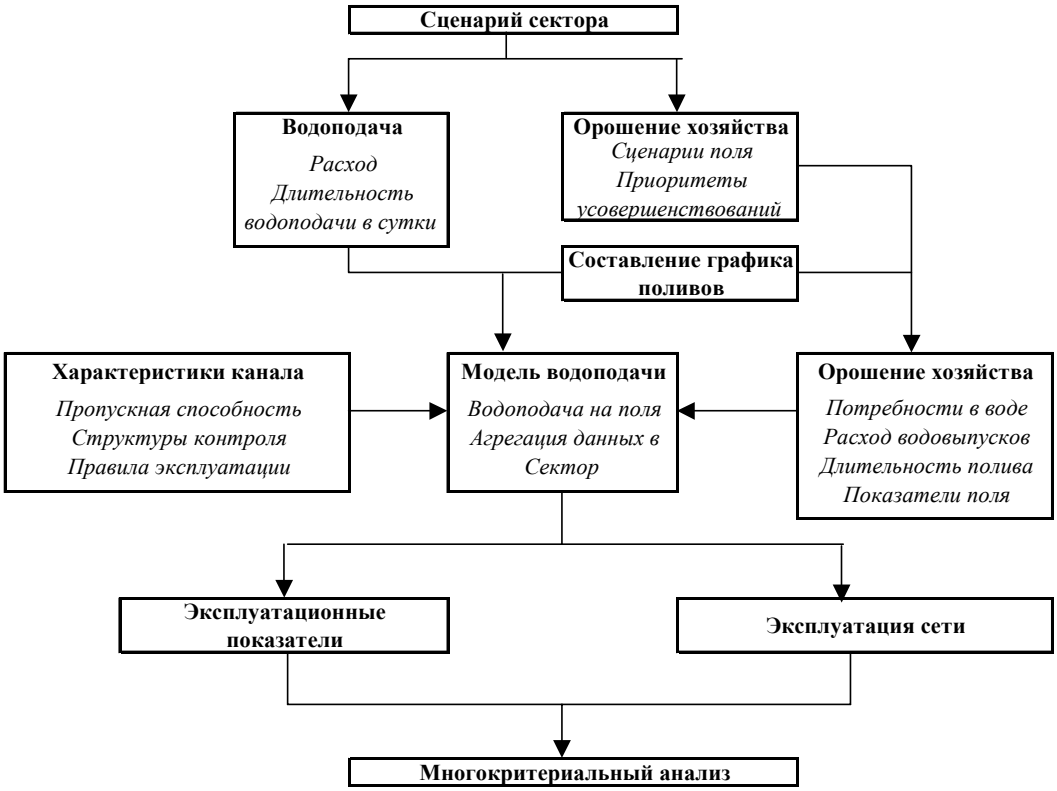


Рис. 2. Блок-схема SEDAM от принятия сценария до многокритериального анализа

Сценарии орошения хозяйства описывают осуществление усовершенствованной практики на уровне хозяйства, такой как принятие соответствующего требованиям графика поливов, включая дефицитное орошение, планировку земель или их выравнивание с целью улучшения условий для добегания поливных струй и равномерности инфильтрации, регулирование расходов водоподачи, с использованием соответствующего оборудования или устройств, ограничение организационных потерь воды и технические приемы повторного использования поверхностного сброса. Каждый *сценарий орошения хозяйства* соответствует при применении SADREG (Госалвес *и др*., 2005) *проекту*, что приводит в результате к множеству сочетаний переменных решения. Каждый *проект* представляет собой шаг к дальнейшему усовершенствованию орошения поля, во многом определяемый навыками управления, мастерством поливальщика и капитальными вложениями.

Сценарии водоподачи относятся к альтернативным управленческим решениям, связанным с водоподачей в хозяйства, снабжаемых из общественной оросительной системы, управляемой АВП или районным органом управления водным хозяйством. В основном эти решения относятся к расходу в голове каналов-распределителей, расходам водовыпусков из них, сроку водоподачи, длительности водоподачи и установлению возможных правил водоподачи, включая схему водооборота и определение приоритет-

ной последовательности орошения полей внутри сектора. Головной расход и сроки водоподачи предполагаются неизменными в течение всего оросительного сезона. Каждое сочетание двух из этих величин образовывает сценарий водоподачи. Пользователь может использовать SEDAM для оценки воздействий на уровне *сектора*, изменяя эти параметры притока в орошаемый контур. В частности, эта модель полезна для оценки возможностей более жестких ограничений водоподачи, когда уменьшение притока в орошаемый контур требуется в целях водосбережения.

Усовершенствованные сценарии для водосбережения и улучшенные условия для возделывания сельхозкультур, разработанные в соответствии с процессом принятия решений, сконцентрированы в таблице 1, в которой цели, переменные условия и ограничения описаны как для хозяйства, так и для оросительных систем, осуществляющих водопоставку.

Таблица 1. Процесс принятия решения для усовершенствованного орошения и водосбережения

	Внутрихозяйственная оросительная система	Система водоподачи
Лицо, принимающее решения	Фермеры (сгруппированные по распределителю)	Правление АВП и представители фермеров
Цели	▪ минимизировать издержки ▪ максимизировать урожай ▪ максимизировать доходы ▪ минимизировать засоление почв ▪ максимизировать водосбережение	▪ минимизировать издержки ▪ максимизировать урожай и доходы ▪ минимизировать воздействие на дренажную систему ▪ максимизировать социальные доходы (т.е. занятость, доходы фермеров)
Переменные решений	▪ расходы водоподачи на поле ▪ способ полива ▪ график поливов ▪ земельные условия (планировка земель, уклон, длина) ▪ повторное использование сброса	▪ расход водоподачи в голове сектора ▪ дата водоподачи ▪ график водоподачи
Ограничения	▪ затраты на воду ▪ возделываемая площадь ▪ земельные налоги ▪ агрономические приемы	▪ система каналов-распределителей ▪ максимальный расход водоподачи

Сценарии создаются путем комбинирования различных «факторов усовершенствования», которые выражают предпочтения лица, принимающего решения, или эксплуатационные условия. Существует четыре фактора усовершенствования: (A) предпочтения, относящиеся к уровню хозяйства при выборе схем орошения полей; (B) сценарии для поля, связанные с усовершенствованием орошения хозяйства; (C) альтернативные головные расходы водоподачи в сектор; и (D) альтернативные суточные длительности водоподачи.

Факторы C и D являются оперативными и играют основную роль в деятельности АВП при планировании и эксплуатации. Таким образом, сценарии для Сектора по существу разрабатываются на основе факторов A и B в сочетании с C и D.

Факторы усовершенствования относятся к следующим уровням:

- Фактор A – A1, когда приоритет отдается экономическим проблемам; A2, если приоритет устанавливается для воздействий на окружающую среду и водосбережение, и A3, если приоритеты сбалансированы
- Фактор B – существует 9 уровней, как показано в таблице 2 со ссылкой на полевые проекты SADREG (Gonçalves *et al*., 2005)
- Фактор C – уровни, соответствующие различным размерам головных расходов, от 0,8 до 1,6 л $с^{-1}$ $га^{-1}$
- Фактор D – уровни относятся к различным суточным длительностям водоподачи от 16 до 24 ч $сутки^{-1}$

Таблица 2. Сценарии усовершенствования орошения хозяйства, относящиеся к проектам SADREG

	Сценарий поля и соответственный уровень применения к сектору (относительно общей площади)										Описание
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
B0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Нынешний
B1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Фактические внутрихозяйственные системы с улучшенным графиком (*)
B2	0	4/8	1/8	1/8	1/8	1/8	0	0	0	0	Частичные усовершенствования полива по бороздам
B3	0	0	1/4	1/4	1/4	1/4	0	0	0	0	Вся площадь при улучшенном поливе по бороздам
B4	0	0	1/4	0	1/4	0	1/4	0	1/4	0	Непрерывный и дискретный полив в каждую борозду
B5	0	0	0	1/4	0	1/4	0	1/4	0	1/4	Непрерывный и дискретный полив через борозду
B6	0	0	0	0	1/4	1/4	0	0	1/4	1/4	Непрерывный и дискретный полив на фоне дефицитного орошения
B7	0	0	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	Непрерывный и дискретный полив через борозду и дефицитное орошение
B8	0	0	0	0	0	0	1/4	1/4	1/4	1/4	Дискретный полив через борозду и дефицитное орошение

(*) Улучшенный график поливов с регулированием длительности водоподачи также для уровней B2–B7.

Моделирование требований на орошение и водораспределение

Для целей водоподачи поля по согласованию с водопользователями/фермерами группируются по длине канала-распределителя второго порядка через соответствующий инструментарий в интерфейсе GIS. Затем производится группировка полей, представленная наборами полей, подвешенных к одному и тому же каналу-распределителю и имеющих идентичный график поливов, т. к. у них те же самые сельхозкультуры и тип почвы, у них также одинаковый график подачи воды.

При использовании SEDAM выполняются следующие шаги (рис. 3):

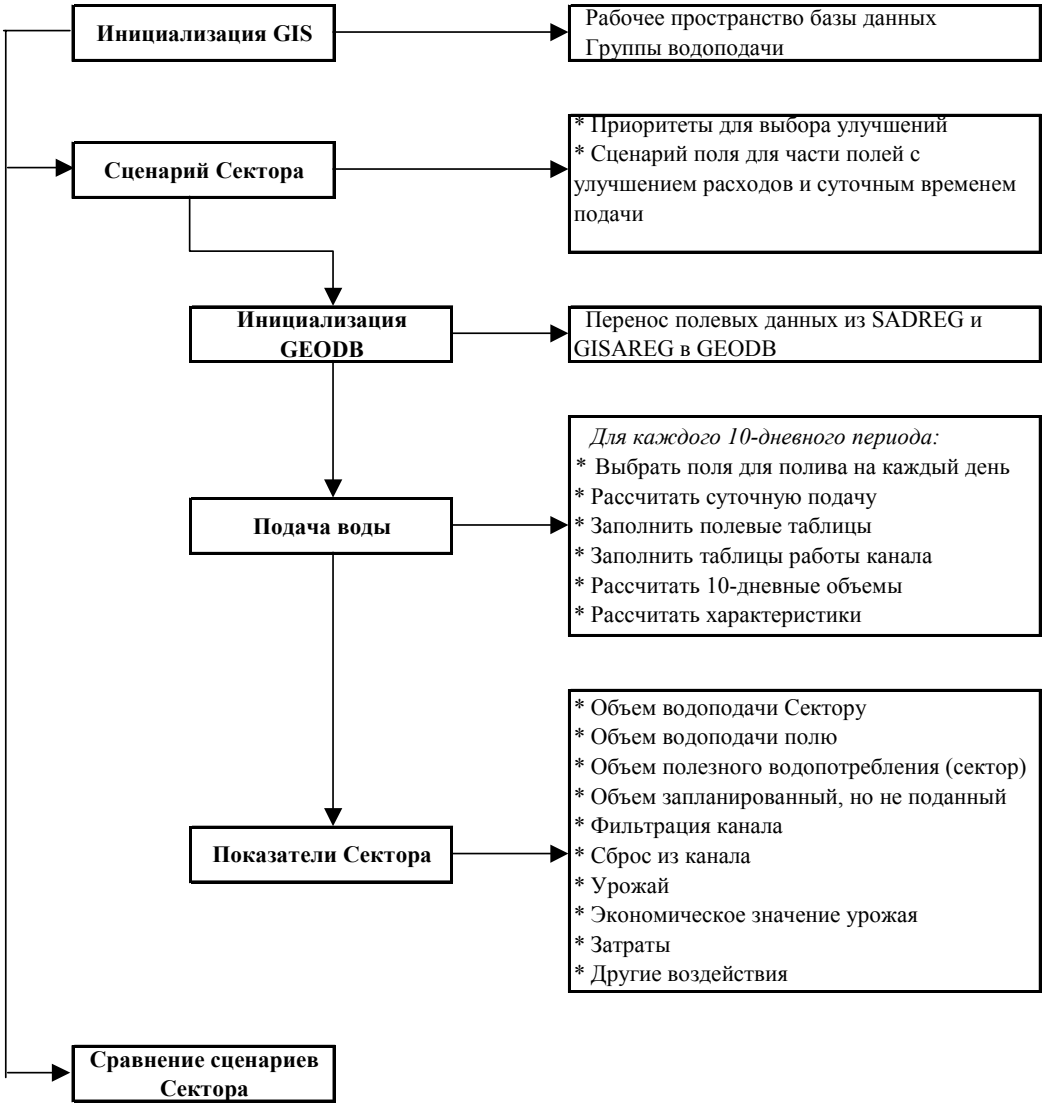


Рис. 3. Последовательность действий от инициализации модели
до сравнения сценариев

1. Инициализация GIS:
   a) Выбор рабочих пространств SADREG, которые характеризуют типичные поля;
   b) Определение групп полей (группирование) при помощи инструментария GIS.

2. Создание сценариев для сектора, при этом необходимо, чтобы пользователь ввел следующие данные:
   a) Приоритеты хозяйства, т. е. назначаются веса различным критериям, относящимся к создаваемому сценарию и используемым в SADREG при выборе оптимизированного орошения хозяйства;
   b) Степень усовершенствования орошения хозяйства, выражаемая соотношением полей внутри сектора, которые принимают усовершенствованный проект орошения (определяется в SADREG);
   c) Головной расход (л $с^{-1}$);
   d) Суточная длительность водоподачи (ч $сутки^{-1}$).

3. Инициализация базы данных GEODB для сценария нового сектора:
   a) Загрузка полевых данных:
      i. Выбранная альтернатива орошения хозяйства;
      ii. Степень усовершенствования орошения (см. подпункт 2.b)
      iii. График поливов, соответствующий усовершенствованию орошения хозяйства, определенному SADREG.
   b) Загрузка *полевых таблиц* с данными, хранимыми в соответствующих рабочих пространствах SADREG:
      i. Количество водовыпусков из системы водоподачи и их соответствующие расходы;
      ii. Требуемые сроки и расход водоподачи ;
      iii. Эксплуатационные характеристики полива (эффективность использования поливной нормы, равномерность распределения инфильтрации, потери на сброс и глубинную фильтрацию, урожайность, издержки, планировка земель и эрозионное влияние на почву)
      iv. Показатели орошения (упомянутые в таблице 1 для внутрихозяйственных оросительных систем).
4. Выполнение моделирования водоподачи для сценария нового сектора (рис. 4).

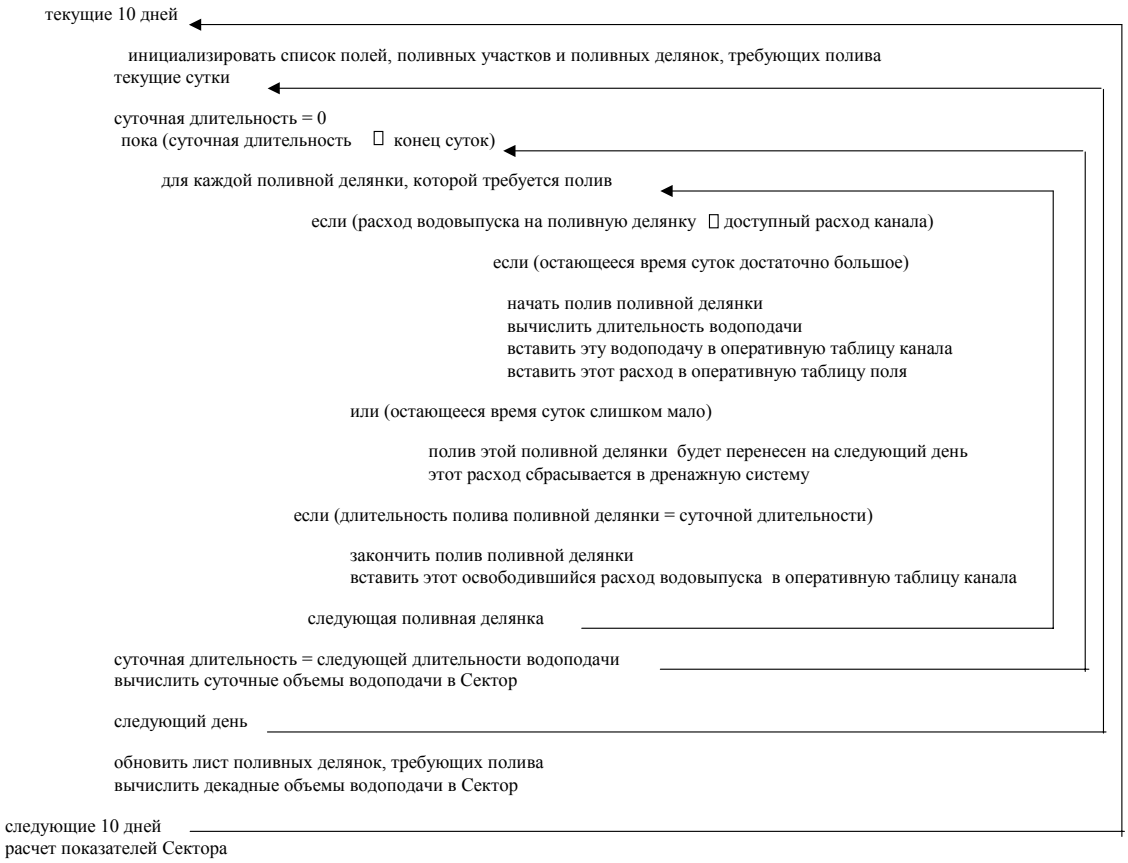


Рис.4. Блок-схема расчетов водоподачи в течение каждого 10-дневного периода

Модель водоподачи из канала использует следующие правила водоподачи и процедуры:

a) Схема водооборота рассматривается в соответствии со структурой посевов и основывается на, предварительно подготовленной пользователем, последовательности группы полей;

b) Предполагается, что водоподача для каждого поля при ограничении доступного расхода из канала-распределителя осуществляется всеми соответствующими водовыпусками;

c) После окончания полива любого поля водоподача на следующее поле начинается после периода ожидания (времени задержки), оцениваемого из расстояния между обоими полями, расхода на этом участке канала и средней скорости течения;

d) Полив поля начинается, когда имеющееся в распоряжении время суток соответствует времени необходимому для полива; в противном случае полив будет перенесен на следующий день;

e) Если вода не подается на поле для орошения в течение текущего 10-дневного периода, оно будет поливаться в начале следующих 10 дней;

f) Когда на поле заканчивается полив, высвобождаемая вода перераспределяется на следующее поле соответственно последовательности графи-

ка водоподачи; полив следующего поля начинается только после периода ожидания, вычисляемого из расстояния между полями; период ожидания рассчитывается на основе средней скорости течения и длины участка канала;

$$t_{lag} = L_{reach} / V_{av} \qquad [1]$$

где t_{lag} (с) – период ожидания между любым изменением в водоподаче и временем возобновления установившегося режима потока; L_{reach} (м) – расстояние между предшествующей и новой точками контроля водоподачи; и V_{av} (м/с) – средняя скорость течения в канале (по умолчанию = 0,5 м/с);

g) Фильтрация из канала оценивается как доля объема потока воды, пропорциональная расходу и протяженности участка канала:

$$Q_{seepage} = Q_{in} \times f_{seepage} \times L_{reach} \qquad [2]$$

где $Q_{seepage}$ ($м^3$/с) – фильтрация, L_{reach} (м) – длина участка канала; Q_m ($м^3$/с) – средний расход на этом участке; и $f_{seepage}$ (%/100 м) – характеристика фильтрации для каждого типа канала.

5. Оценка результатов сценария нового сектора. Схема сохраняется в GEODB, а результаты можно просматривать в виде таблиц или графиков GIS, включая:

a) Данные о распределении полей, в том числе начало и конец полива;

b) Данные, характеризующие управление оросительной сетью и относящиеся к расходу водорегулирующих сооружений в течение оросительного периода;

c) Объемы воды, включая эффективную водоподачу, фильтрацию и сброс;

d) Эксплуатационные характеристики, связанные с экономическими и экологическими воздействиями.

6. Сравнение сценариев, разработанных для сектора с использованием многокритериального анализа, как показано в следующем разделе.

Объединение с GIS

Расширением возможностей SEDAM, предназначенным для ввода исходной информации и анализа результатов является объединение его с GIS. Поскольку база данных содержит географически представленные объекты (поля, участки каналов или узловые точки), представляется логичным исследовать эти возможности. Пользователю удобнее выполнять применяя GIS некоторые из его задач, такие, как создание и сортировка групп водо-

подачи, с применением рабочего пространства SADREG (характеристика типичных полей) к реальным полям или определение границ каждого сектора. Кроме того, пользователь может запустить обе модели SEDAM и SADREG непосредственно для сектора или единственного поля, по которому он хочет смоделировать или просмотреть данные. Применение GIS позволяет вызвать SADREG из выбранного пользователем поля (рис. 5) или SEDAM из выбранного пользователем сектора.

Кнопки интерфейса GIS имеют несколько функциональностей:

- GIS-SEDAM – эти функции выполняют взаимодействия с базой данных SEDAM:
  - Запуск модели SEDAM с выбором сценария сектора. Выбор производится по карте (выбор сектора) и из списка существующих сценариев для выбранного сектора (выбор сценария)
  - Создание и сортировка групп на основе выбранных по карте полей (рис. 6)
  - Просмотр оперативных результатов в таблице результатов для выбранного на карте поля или участка канала

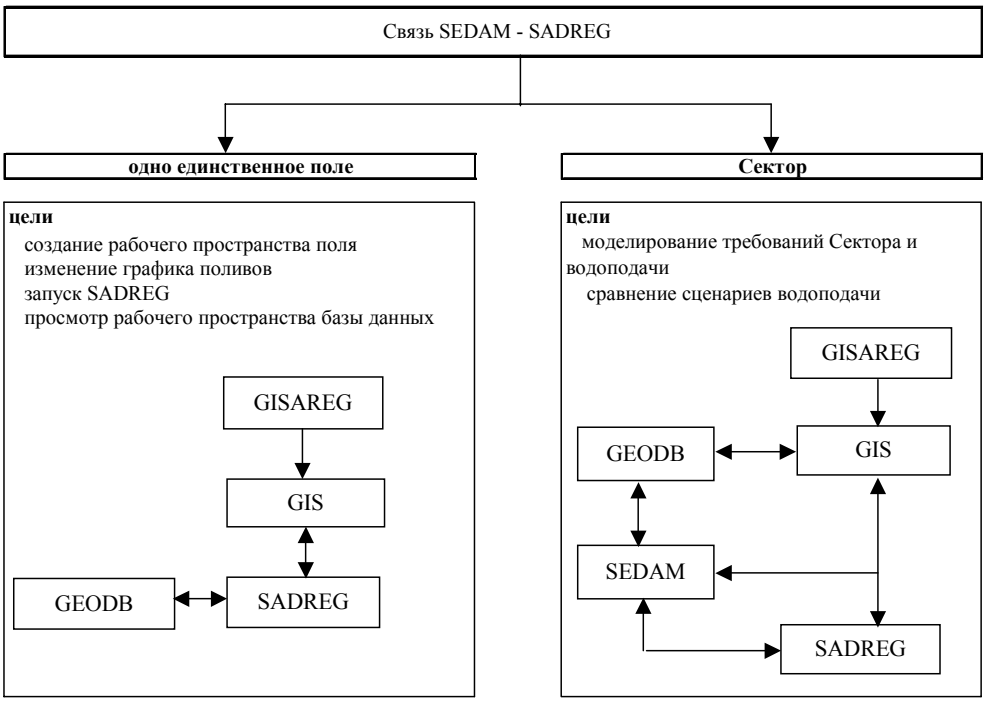


Рис.5. Применение моделей SADREG во взаимодействии с базой данных GIS GEODB

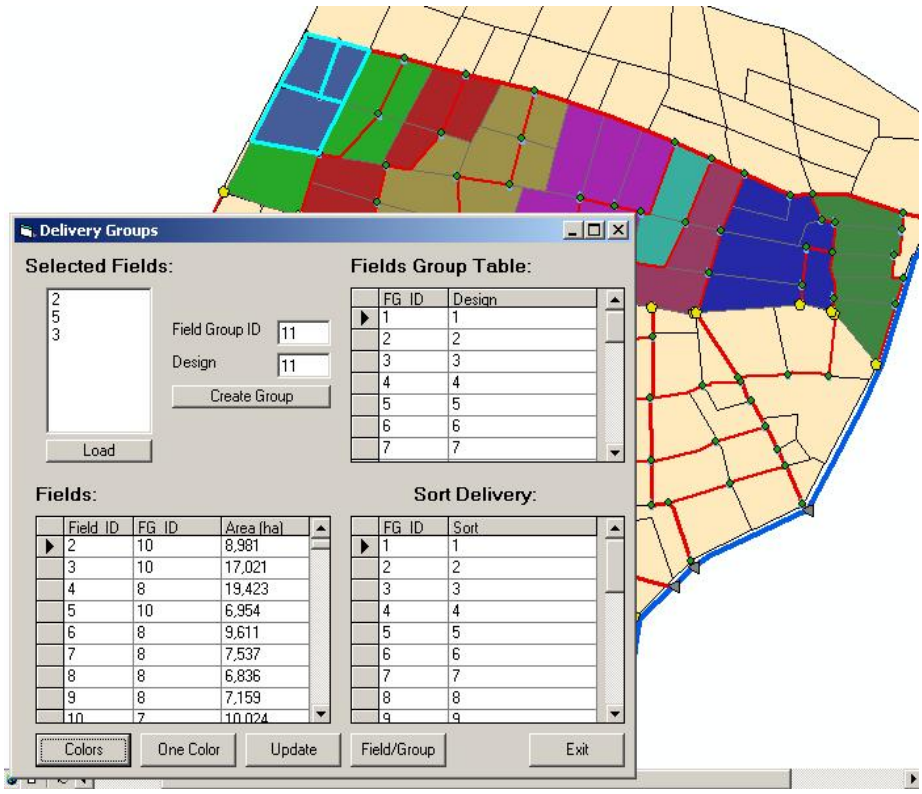


Рис.6. Способ определения групп водоподачи вдоль канала, при котором пользователь выбирает поля по карте, а таблица создается автоматически и на карте цветом выделяются результаты

- Просмотр оперативных графических результатов, для выбранного на карте поля или участка канала GIS-SADREG – эти функции выполняют взаимодействия с базой данных SEDAM и моделью и базой данных SADREG:
  - Запуск модели SADREG для выбранного на карте поля
  - Создание новых рабочих пространств и привязка их к полям (рис. 7)
  - Создание новых проектов орошения
- Преобразование типа представления данных – функциональность для импорта и экспорта данных между базами данных SEDAM, SADREG и GISAREG.

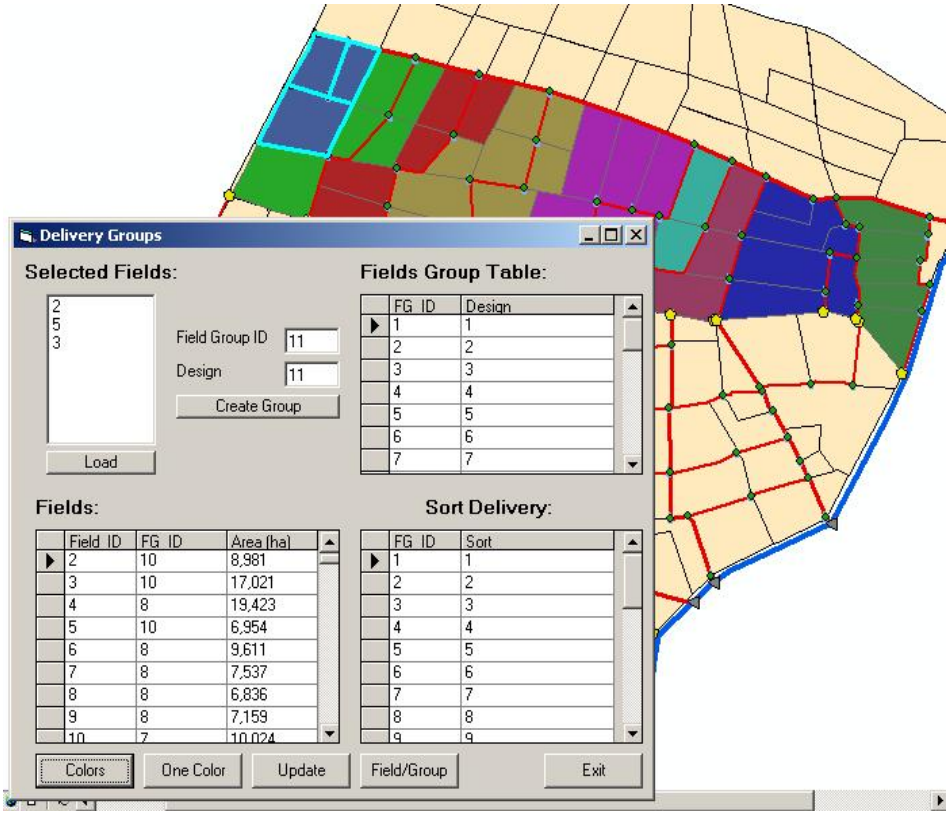


Рис. 7. Связь рабочего пространства с картой полей

Многокритериальный анализ

Многокритериальный анализ рассматривает критерии и атрибуты, описанные в таблице 3, имея в виду следующие:

- Ожидаемые доходы фермеров
- Предвиденные затраты фермеров и АВП и
- Экологическую пользу, включая водосбережение.

Относительно критериев, приведенных в таблице 3 функции полезности U следующие:

- Доходы

$$U_i = \alpha_{Mi} \cdot (X_i - X_{i.min}) \qquad [3]$$

- Затраты

$$U_j = 1 - \alpha_{Mj} \cdot (X_j - X_{j.min}) \qquad [4]$$

- Экологические проблемы

$$U_k = 1 - \alpha_{Mk} \cdot (X_k - X_{k.min}) \qquad [5]$$

где значения, принятые для α и диапазон для X приводятся в таблице 3.

Таблица 3. Критерии и показатели, используемые при многокритериальном анализе

Критерии	Показатели	X_{min} (a)	X_{max} (a)	α_M (a)
Доходы	Продуктивность использования земли (кг/га)	2683	3030	0,00288
	Экономическая продуктивность использования земли (€/га)	805	909	0,00960
	Продуктивность использования воды (кг/м^3)	0,0863	0,9763	1,1235
	Экономическая продуктивность использования воды (€/м^3)	0,0259	0,2928	3,74513
	Доля полезного водопользования (-)	0,1528	0,7260	1,744
	Стоимость урожая к общим затратам (-)	0,2504	2,1070	0,5386
Затраты	Общие затраты на единицу использованной воды (€/м^3)	0,1033	0,1535	19,899
	Фиксированные затраты на единицу использованной воды (€/м^3)	0,0012	0,0314	33,012
	Переменные затраты на единицу использованной воды (€/м^3)	0,1019	0,1474	21,997
	Эксплуатационные затраты на поставку воды (€/м^3)	0,8040	2,1440	0,7463
Вопросы экологии	Суммарное водопотребление (сектор и поля) (м^3/га)	9111	20522	8,763E-5
	Доля сброса от водопотребления (поле) (-)	0	0,568	1,759
	Глубинная фильтрация/ риск засоления (м^3/га)	330	7400	0,141E-3
	Воздействие планировки земель на почву (см)	0	3,92	0,255
	Индекс риска почвенной эрозии (индекс)	1	9	0,125
	Фильтрация из канала (коэффициент)	0,082	0,113	32,42
	Сброс из канала (коэффициент)	0,207	0,365	6,313

(a) Эти значения вычисляются автоматически и обусловлены набором фактических данных.

Принимая определяемые пользователем веса (λ_j) для каждого критерия j, глобальная полезность рассчитывается, как:

$$U = \sum_{j=1}^{7} \lambda_j \cdot U_j \qquad [6]$$

Многокритериальный анализ, используемый для ранжирования смоделированных сценариев, производится следующим образом:

- Эксплуатационные характеристики (таблица 4) для смоделированных сценариев, относящиеся к сектору, считываются из сравнительной таблицы GEODB и вычисляются соответственные средние
- Значения полезности рассчитываются из средних показателей (уравнения 3-5)
- Определенные пользователем веса для критериев считываются из соответствующего файла и вычисляется глобальная полезность (уравнение 6)
- Сценарии ранжируются согласно значениям глобальной полезности.

Таблица 4. Эксплуатационные характеристики, относящиеся к сектору орошения

Показатели	**Описание**
Количество дней водоподачи (N_{days})	Количество дней в году, требуемое для полива
Водоподача на поле (м^3)	Объем воды, поданный на поле
Полезное водопользование, поле (м^3)	Объем воды, поданный и полезно использованный на поле
Глубинная фильтрация с поля (м^3)	Объем воды ушедший за пределы корнеобитаемой зоны
Поверхностный сброс с поля (м^3)	Объем сбросных вод с поля
Дефицит водоподачи на поле (м^3)	Объем воды, не поданный на поле во время планируемого 10-дневного периода водоподачи
Водоподача (м^3)	Объем воды, поданный в сектор
Фильтрация из канала (м^3)	Объем фильтрации воды из системы оросительных каналов
Сброс из канала (м^3)	Объем воды, сброшенной из канала в коллекторно-дренажную систему
Эксплуатационные затраты по подаче (€)	Общие затраты на эксплуатацию системы каналов
Урожай (кг)	Урожай хлопчатника, предполагаемый нормативным
Величина урожая (€)	Величина урожая
Фиксированные затраты на поле (€)	Фиксированные затраты хозяйства
Переменные затраты на поле (€)	Переменные затраты хозяйства
Общие затраты на поле(€)	Общие затраты хозяйства
Воздействие планировки земель (см)	Слой почвы, подвергшийся срезке
Воздействие эрозии на почву	Индекс риска эрозии, определяемый характеристикой почвы

Применение и результаты

Модель SEDAM была применена к сектору в одном из орошаемых районов Центральной части Ферганской долины (рис. 8). К этому сектору осуществлена привязка (рис. 7) рабочего пространства, разработанного моделью SADREG (Гонсалвес *и др.,* 2005).

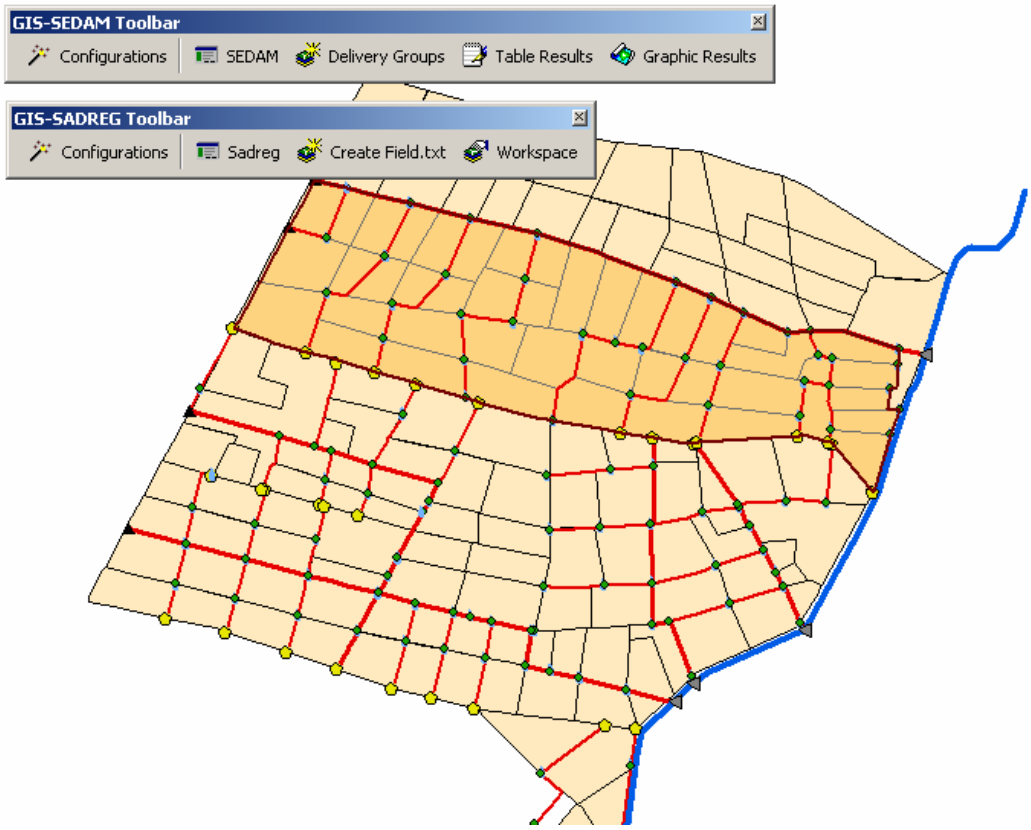


Рис. 8. Карта сектора орошаемого района в Ферганской долине
и клавиши связи функциональности GIS и обеих моделей SEDAM и SADREG

Группы идентичных по водоподаче полей были подготовлены при помощи интерфейса GIS (рис. 6), который, комбинируя сведения об оросительной сети и полях для проектирования более выгодного графика водоподачи, показал, что является практичным инструментом при планировании водоподачи.

Сценарии Сектора, рассматриваемые в этом исследовании, создавались из сочетаний проектных переменных, представленных в таблице 5, с применением для всех рассматриваемых случаев расхода водоподачи в сектор 1,5 м^3/с (соответствует гидромодулю - 3,2 л/(с га).

Выходные результаты для водоподачи на поле представляются в таблице посредством SEDAM, а графические – через расширение GIS (рис. 9), которое выдает гидрограф суточной водоподачи , 10-дневную расчетную водоподачу и дефицит водоподачи.

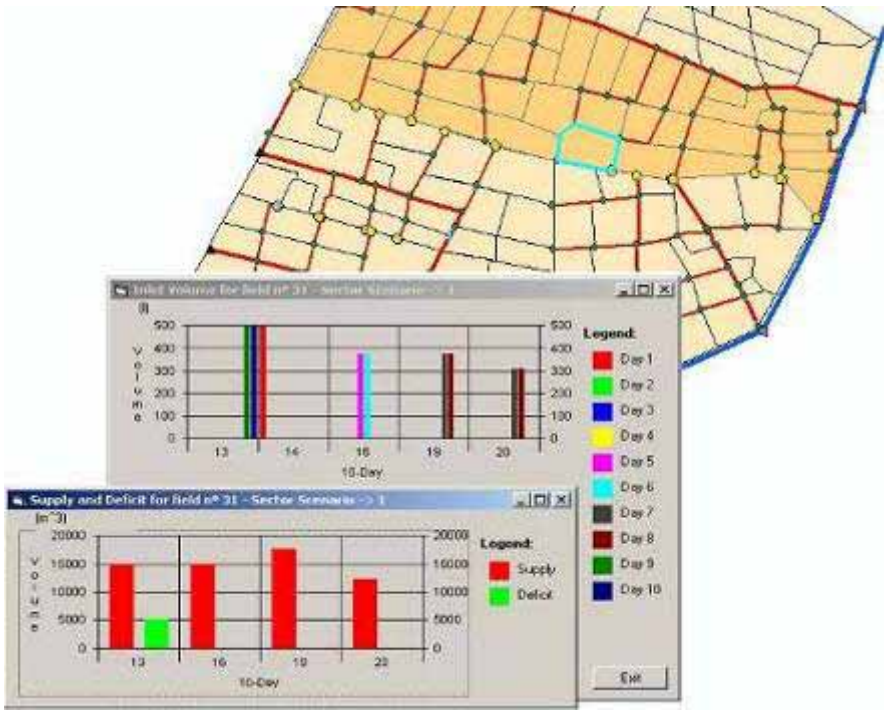


Рис. 9. Графические результаты гидрографа суточной водоподачи, расчетная водоподача и дефицит водоподачи для поля 31 по сценарию B1

Для всех сценариев результаты сравнивались по всем показателям (таблица 4) и позициям (таблица 5), характеризующим каждый сценарий, также как соответствующая полезность (уравнения 3-6), экспортируемая для дальнейших анализов из файлов Excel. Соответствующие примеры – на рис. 10-15.

Таблица 5. Позиции сценариев для сектора

	Сценарии	Суточная длительность водоподачи = 20 ч сутки$^{-1}$	
		A1 Приоритет – экономика	A2 Приоритет – экология
B0	Нынешний	✓ □	
B1	Нынешний с улучшенным графиком водоподачи		✓ □
B2	Частичные усовершенствования полива по бороздам		✓ □
B3	Вся площадь под усовершенствованным поливом по бороздам		✓ □
B4	Непрерывный и дискретный полив в каждую борозду		✓ □
B5	Непрерывный и дискретный полив через борозду		✓ □
B6	Непрерывный и дискретный полив; дефицитное орошение		✓ □
B7	Непрерывный и дискретный полив через борозду: дефицитное орошение		✓ □
B8	Дискретный полив через борозду; дефицитное орошение		✓ □

10-дневные объемы водоподачи в сектор, распределенные по полям, фильтрация из каналов и глубинная фильтрация на полях, сброс с полей и каналов изображены на рис. 10-12 для сценариев B0, B1 и B6, соответственно, а суммарные объемы, поданные в сектор при всех сценариях, представлены на рис. 13. Результаты подтверждают влияние водосбережения, обусловленное соответствующими усовершенствованиями на уровне полей: график поливов (сценарии B1–B8), планировка полей и системы орошения по бороздам (B2–B8).

Нынешний сценарий B0 (рис. 10) показывает, что объемы сброса из канала и с поля и глубинная фильтрация в поле превышают полезное водопотребление. В то время как вода, просочившаяся ниже корнеобитаемой зоны до засоленных грунтовых вод может быть непригодной для повторного использования, сброс из канала и поверхностный с поля возвращается в реку или повторно используется ниже по течению, т. е. не является потерей, но предполагает высокие эксплуатационные издержки и проблемы управления.

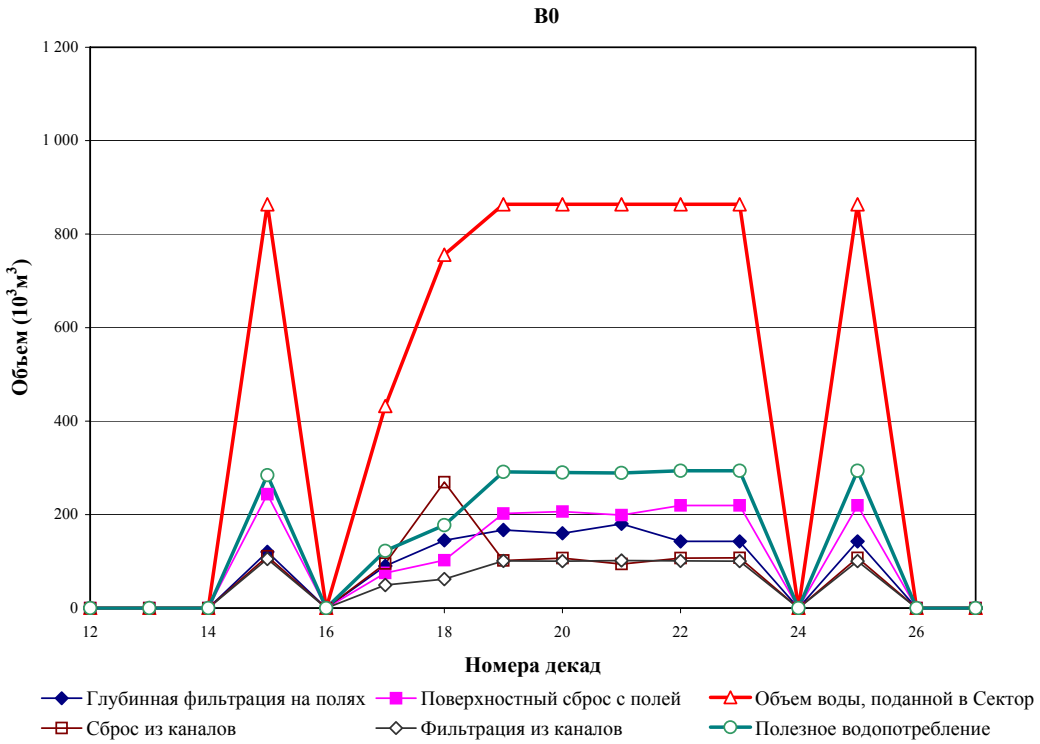


Рис.10. Сценарий В0, нынешний: объемы водоподачи за 10 дней и компоненты использования воды

К сценарию В1 (рис. 11) относится применение улучшенного графика поливов с очень четким «включением-отключением» водоподачи нормой лишь 60 мм, на фоне нынешнего уровня эксплуатации внутрихозяйственных оросительных систем. Эта ситуация трудновыполнима, потому что поливная норма представляет лишь половину нынешней; однако, возможна, если на уровне поля осуществляется очень хорошее регулирование расходов, благодаря чему существенно снижаются поверхностный сброс с поля и глубинная фильтрация. Результаты на уровне распределения расходов превосходные, потому что длительность водоподачи для водовыпусков с 20 л/с создала возможность оптимального суточного водооборота между полями, и благодаря этому позволила значительно снизить сброс из канала. Хотя сумма сброса из канала, сброса с поля и глубинной фильтрации все еще выше, чем полезное водопотребление.

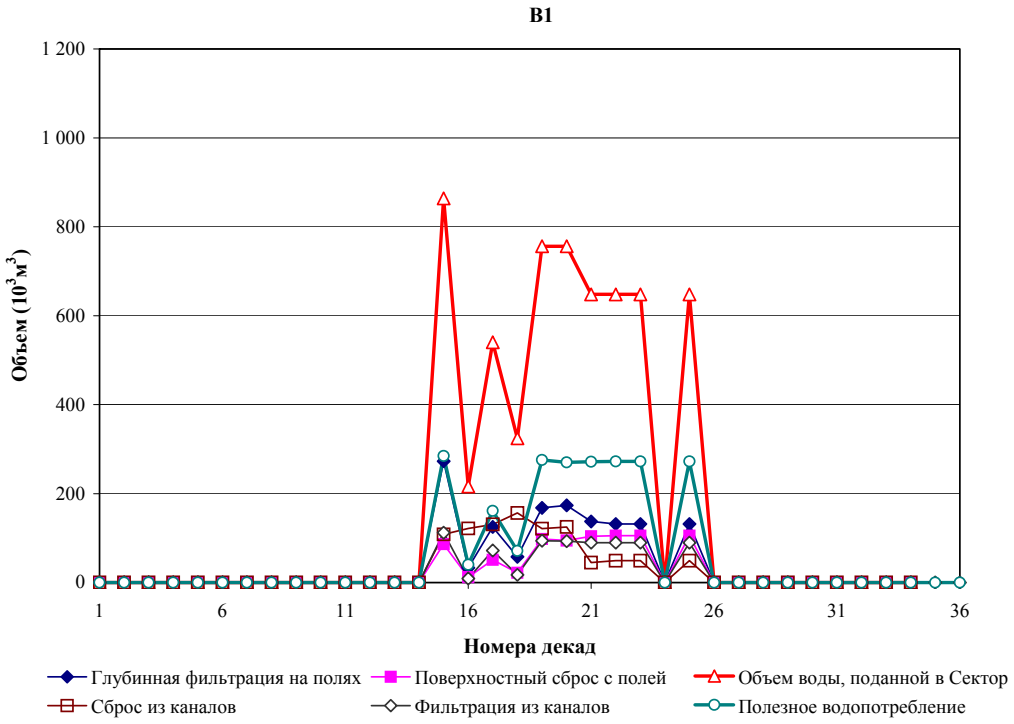


Рис. 11. Сценарий B1 с уточненной длительностью водоподачи: объемы водоподачи за 10 дней и компоненты использования воды

Улучшенные сценарии орошения хозяйства предусматривают график поливов, с более реальной поливной нормой 80 мм. В этом случае длительность водоподачи через 20 л/с водовыпуски требует 12-часовой длительности водоподачи на поле; таким образом, 20-часовая длительность суточной водоподачи делает невозможным полив двух полей в течение одного дня, если только не увеличить расход полевых водовыпусков (эти стратегии еще не моделировались, но в модель заложена возможность расчета различных альтернатив по условиям водоподачи). Соответственно этим ограничениям сценарии B2–B8 приводят к результатам, которые лишь немногим лучше, чем нереальный сценарий B1, подтверждающий важность точного учета условий водоподачи на поле в соответствии с поливной нормой. Сценарий B6 лидирует в повышении полезного водопотребления, что объясняется следующим: (a) выбор срока полива и поливной нормы соответствуют потребностям сельхозкультуры; (b) планировка поля благоприятствует ограничению глубинной фильтрации и поверхностного сброса; однако, поверхностный сброс не так хорошо управляется как в сценарии B1, т. к. в конце вегетационного периода инфильтрация почвы ниже, меньше воды впитывается и больше воды уходит за пределы поля; (c) дефицитное орошение, которое позволяет повысить полезное водопотребление, в сравнении с бесполезными затратами в начале сезона и с изменением ситуации на противоположную в конце поливного сезона (рис. 12).

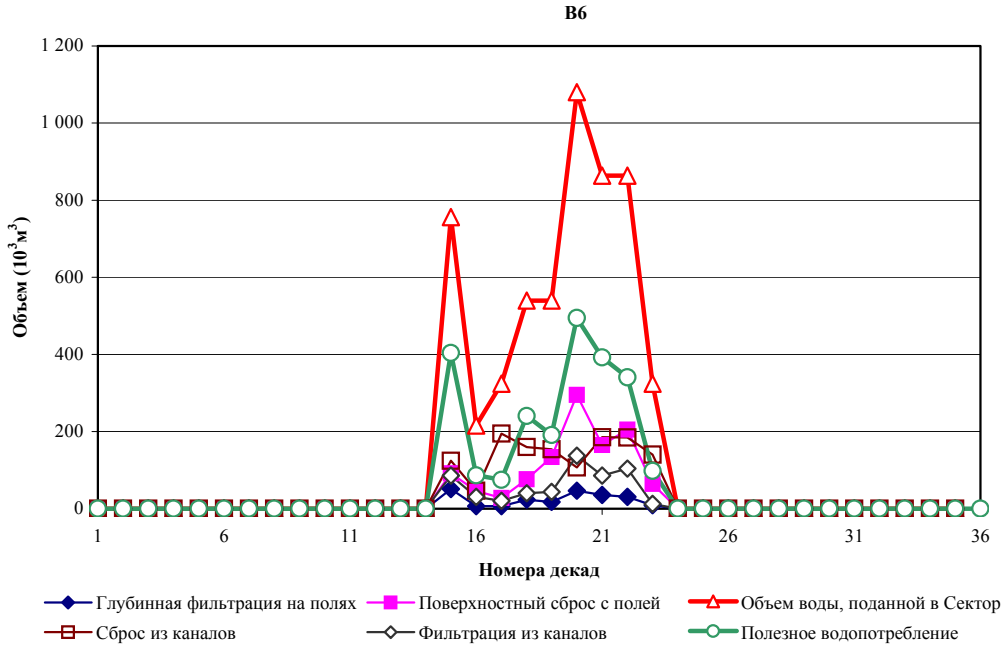


Рис.12. Объемы подачи воды сектору за 10 дней
и использование воды для сценария B6

Рис. 13 показывает объем и соответствующие компоненты сезонного водопотребления для каждого сценария. Он идентифицирует полезное и бесполезное водопотребление и соответствующие изменения по каждому из сценариев. Сценарии, которые предполагают полное совершенствование орошения полей (B3–B8), демонстрируют наилучшие результаты водосбережения на уровне хозяйства. Как ранее отмечалось, существенным результатом улучшенных сценариев является снижение глубинной фильтрации с весьма положительным влиянием этого на борьбу с засолением. Однако, снижение глубинной фильтрации ведет к увеличению поверхностного сброса с поля, который можно повторно использовать.

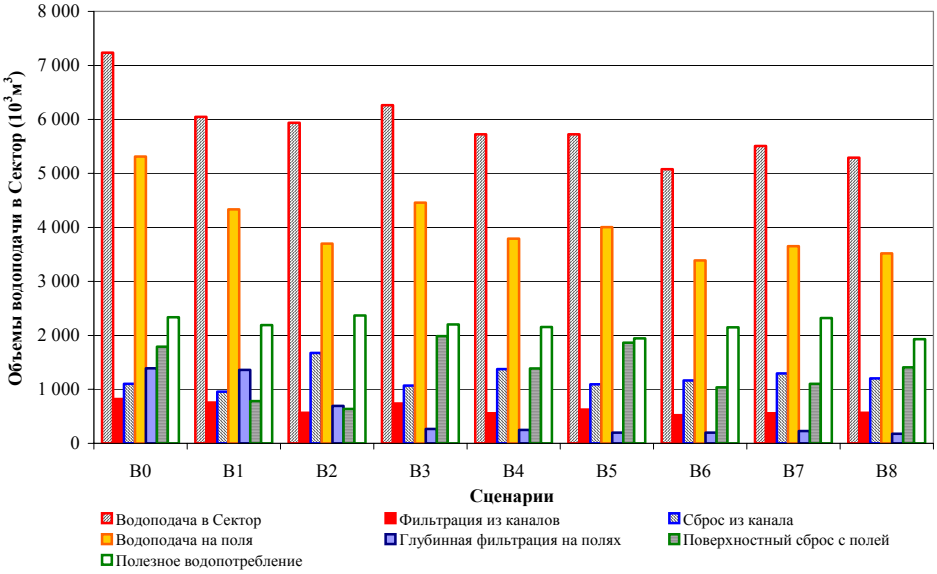


Рис. 13. Сезонное использование воды – общая водоподача, полезное и бесполезное водопотребление – для сценариев B0-B8

Рис. 14 относится к экономическим данным – экономической продуктивности использования воды (для хлопчатника), фиксированным и переменным затратам на единицу использованной воды. Изменчивость фиксированных и переменных затрат на уровне поля небольшая, обусловлена она незначительными инвестициями и низкой стоимостью труда. Противоположна по изменчивости экономическая продуктивность использования воды, являющаяся главным фактором, связанным с водосбережением.

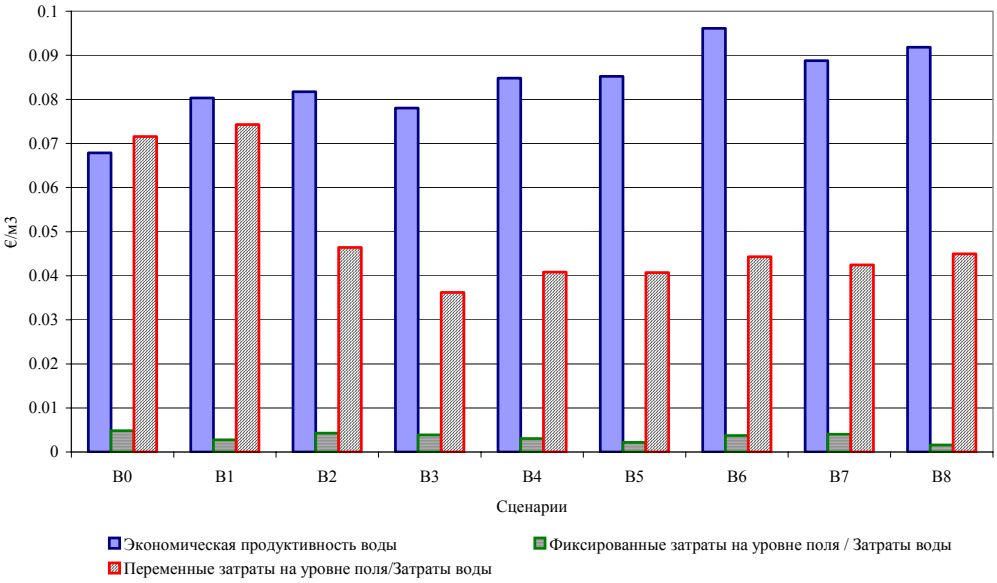


Рис. 14. Экономические показатели сценариев сектора

Сценарий В6 имеет высшую экономическую продуктивность использования воды, т.к. это сценарий, представляет ниже обычного объем водоподачи в Сектор и самую высокую долю полезного водопотребления, помимо этого он относится к дефицитному орошению.

Рис. 15 представляет сравнительную глобальную полезность всех сценариев. При небольших различиях среди всех улучшенных сценариев В1–В8, все эти сценарии имеют глобальную полезность намного выше нынешней ситуации. Различия небольшие, потому что сценарии не демонстрируют существенных различий в продуктивности использования земли и связанных с этим затрат, обусловленных незначительными инвестициями и низкой стоимостью труда.

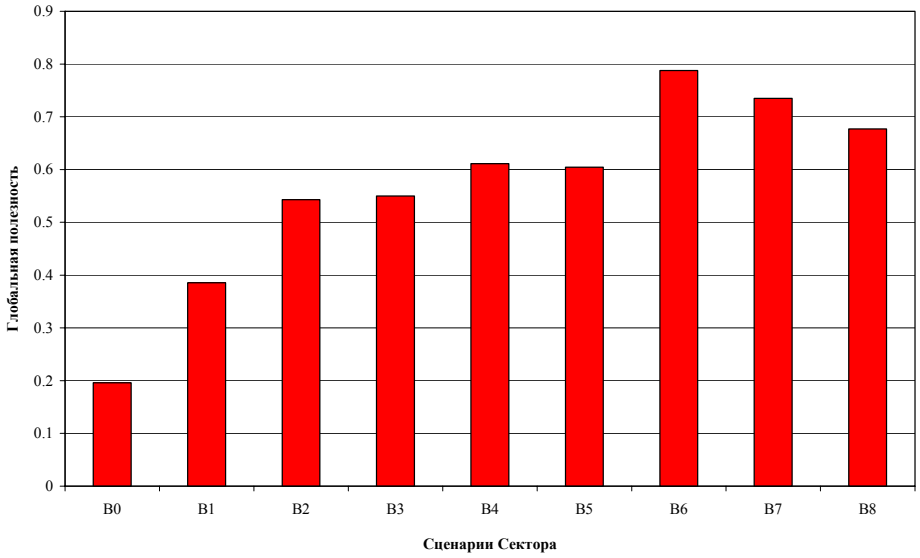


Рис.15. Глобальная полезность сценариев сектора

Заключение

Можно придти к выводу, что модель SEDAM обладает достаточным потенциалом, чтобы стать весьма полезным инструментом для поддержки процесса принятия решений, относящихся к усовершенствованиям, как внутрихозяйственных оросительных систем, так и систем каналов-распределителей. Однако, это требует разработки довольно обширной базы данных, для охарактеризования соответствующих усовершенствований и более точной, чем была доступна для данного моделирования, информации о системе водоподачи. Совмещение модели с GIS повышает ее возможности при оценке входных пространственных данных и поддерживает дружественный для пользователя интерфейс, как при работе модели, так и при просматривании результатов. Тем не менее, т. к. в результатах по каждому

сценарию участвует значительное количество показателей и параметров, дополнительно для анализа результатов требуется использование Excel.

Результаты, полученные для Ферганской долины, демонстрируют существование здесь значительного потенциала для решения существующих проблем водопользования и засоления, когда, главным образом, с целью согласования водоподачи и графика поливов в хозяйстве, управление системами распределения объединяется с усовершенствованием орошения хозяйства. Усовершенствования, вполне тщательно выявленные по результатам модели SADREG (Гонсалвес *и др.,* 2005) такие, как дискретный полив, планировка полей, подбор длины борозд и, главным образом, соответствующие регулирование расходов, длительности водоподачи и сроков поливов, требуют модернизации внутрихозяйственных систем. Наряду с этим требуются усовершенствования в водоподаче, связанные с продолжительностью водоподачи и назначением сроков водоподачи.

Для всех сценариев сброс из каналов существенен и дальнейшее усовершенствование сценариев потребует более тщательной оценки водоподачи. В дальнейших исследованиях это может быть сделано путем совместного рассмотрения предложений Духовного и Тучина (2005), относящихся к усовершенствованию эксплуатационных характеристик оросительных каналов. Однако, сочетание этого математического моделирования и подхода, представленного в этой статье требует продолжительных модельных исследований, которые не возможно было осуществить за временной период, отпущенный на проект. Фактически, подход SEDAM сфокусирован на связи модернизации орошения хозяйства с соответствующим ей изменением спроса на воду, в то время как Духовный и Тучин (2005), в основном, рассматривают вопросы гидравлического моделирования. Объединение обоих подходов может стать ключевым при создании модели водоподачи и водораспределения в реальном времени.

Высокий сброс из каналов доказывает, что установление соответствующих правил водоподачи является существенно важным для гарантии эффективного водораспределения, имеющего целью водосбережение и повышение доходов фермеров. Представленные результаты были получены для варианта водораспределения, с длительностью водоподачи, составлявшей 20 часов в сутки, при неизменных расходах полевых водовыпусков и длительности водоподачи приравненной длительности полива поля. Дальнейшие усовершенствования с целью назначения более оптимальной длительности водоподачи на поля требуют проверки, при переменных расходах водовыпусков.

Библиография

Гонсалвес, Дж.М., Хорст, М.Г., Ролим, Дж., Муга, А. 2005. SADREG, DSS для поверхностного полива (в этой книге).

Духовный, В.А., Тучин, А.И. 2005. Моделирование эксплуатационных характеристик оросительных каналов и водораспределения (в этой книге).

Фортес П.С., Теодоро П.Р., Кампос А.А., Матеус П.М., Перейра Л.С. 2005b. Средства моделирования для расчета графика поливов: WINISAREG и GISAREG (в этой книге).

Fortes, P.S., Platonov, A.E., Pereira, L.S., 2005a. GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. Agricultural Water Management. 77: 158-179.

Gonçalves, J.M, Pereira, L.S., Campos, A.A., Fabião, M.S., 2003. Demand and delivery simulation and multi-criteria analysis for water saving. In: Pereira LS, Cai LG, Musy A, Minhas PS (eds.), Water Savings in the Yellow River Basin. Issues and Decision Support Tools in Irrigation. China Agriculture Press, Beijing, pp. 247-272.

Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., Campos, A.A., Fabião, M.S., Li, Y.N., Liu, Y., Cai, L.G., 2004. Demand and delivery simulation and multicriteria analysis for water saving in the lower yellow river basin. In: GH Huang, LS Pereira (eds.) Land and Water Management: Decision Tools and Practices (Proc. 7th Inter-Regional Conf. Environment and Water, Beijing). China Agriculture Press, Beijing 1, pp. 275-289.

Malazewski, J. 1999. GIS and Multiple Criteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, Toronto.

Manoliadis, O., 2001. Environmental Indices in Irrigation Management, Environmental Management , 28 (4), pp. 497-504.

Roy, B., D. Bouyssou, 1993. Aide Multicritère: Méthodes et Cas. Economica, Paris.

Часть 6

БУДУЩЕЕ РАЗВИТИЕ

Глава 20.

БУДУЩИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В.А. Духовный[33], Л. С. Перейра[34]

Реферат: Понятие «устойчивое развитие» предполагает сочетание четырех основных потенциалов: природного, производственного, финансового и человеческого, находящихся в постоянной связи и динамике под действием трех основ: политической системы – руководства; общественного климата – социума и системы управления. Их взаимодействие в результате действующих движущих сил определяет, как будут сохранены ресурсы и, в конечном счете, хватит ли воды для жизнеобеспечения стран Аральского бассейна. Чтобы наметить возможную стратегию выживания региона нужно проанализировать, хотя бы приблизительно, каково состояние каждого из этих потенциалов в целом и в отдельных странах и что нужно сделать для укрепления этих потенциалов и обеспечения устойчивости водного сектора в Центральной Азии. Помимо этого в статье обсуждается, как можно внедрить интегрированное управление водными ресурсами в регионе, и подчеркивается необходимость участия общественности, нового социального отношения к воде, образования и тренинга, развития организационного потенциала и обновленная роль государства. Также представлена перспектива дальнейшего применения инструментов, разработанных в рамках проекта.

[33] Научно-информационный центр МКВК, Узбекистан, г. Ташкент, 700187, м-в Карасу-4, дом 11. dukh@icwc-aral.uz

[34] Agricultural Engineering Research Center, Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal, lspereira@isa.utl.pt

Ключевые слова: бассейн Аральского моря, устойчивое развитие, природные ресурсы, людские резервы, руководство, участие общественности, орошение, сельское хозяйства, дефицит воды.

Введение

Устойчивость на перспективу любой территориальной единицы среды обитания – будь то страна, регион, речной бассейн, область или даже любое муниципальное формирование – определяется наличием и развитием в каждом из этих территориальных пространств четырех потенциалов: природного, человеческого, производственного и финансового. Как было показано (Духовный В.А., 2004 г.), природа и высший разум, формировавший двадцать тысяч лет цивилизацию, создал современное человечество как сочетание природы и «*социума»* – общности «homo sapiens». Первоначальное первобытное общество было сочетанием *природного и человеческого потенциала*, возникших в начале отсчета истории человечества, которое развивалось во взаимодействии и взаимовлиянии, в определенных рамках постепенно вырабатывавшихся общественных форм, одновременно выкристаллизовывали *производственный потенциал* как свое производное - в начале в виде сохи, лопаты или гончарного круга, а затем мануфактуры, рудников, заводов, а ныне огромных производственных конгломератов и монополий. Появление денег как средства обмена и торговли по мере развития производственного и человеческого потенциалов повлекло создание еще одного потенциала – *финансового*. Таким образом, ныне устойчивость любой территориальной единицы среды обитания определяется наличием и развитием этих четырех потенциалов (рис. 1).

Производственный и финансовый потенциалы являются результатами развития природного и человеческого потенциала. При этом развитие любой территориальной единицы в значительной степени идет путем балансирования за счет перетекания мощностей невозобновляемых ресурсов природы в производственный и финансовый потенциалы, а также вследствие использования возобновляемых природных и человеческих ресурсов.

Наращивание производственного потенциала в процессе развития также подпитывает финансовый, но и накопленный финансовый потенциал должен более того усиливать и развивать возможности производственного потенциала к умножению его мощностей, точно так же как мощности человеческого, производственного и финансового потенциала должны усиливать друг друга и одновременно обеспечивать стабильность в использовании и восстановлении возобновляемых природных и человеческих ресурсов, вместе с рациональным использованием невозобновляемых ресурсов.

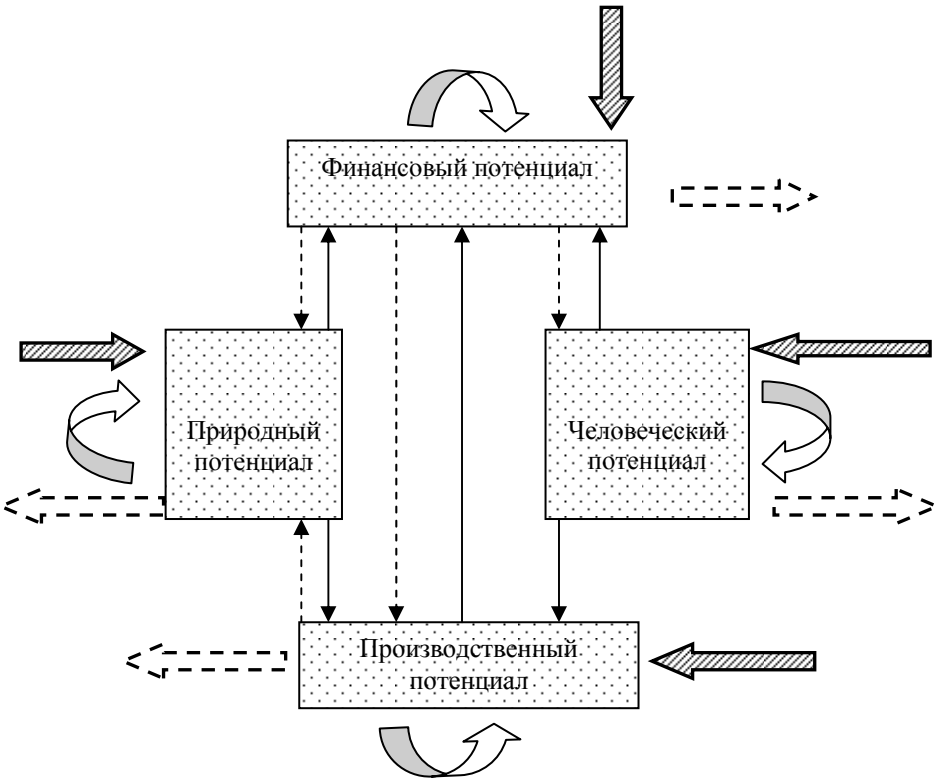


Рис. 1. Схема взаимодействия четырех потенциалов устойчивого развития, представляющая внутренние связи, а также внешние притоки и оттоки

Если все эти соотношения являются рациональными и гармоничными, тем самым обеспечивая взаимопокрытие, то результирующий баланс в накоплении своих мощностей будет положительным. Следовательно, обеспечивается способность к воспроизводству: природных элементов (самоадаптация естественных условий), человеческого потенциала (человек совершенствует и развивает себе подобных), производственного (один вид деятельности порождает другой) и финансового (деньги «делают» деньги).

В масштабах крупных территориальных единиц (стран, регионов) важное значение имеет баланс импорта-экспорта людского потенциала (т. е. баланс между утечкой «мозгов» и привлечением квалифицированных специалистов), точно также как и финансового (займы, кредиты, донорское и дотационное влияние, равно как и отток капитала законным и нелегальным путями). Производственный потенциал также может экспортироваться или импортироваться путем вывоза сырья, полуфабрикатов или ввоза оборудования, транспортных средств и т. д. Даже природный потенциал, особо вода, может экспортироваться или импортироваться путем перераспределения водных ресурсов или вывозом и акклиматизацией фауны и флоры.

В отношении пяти стран центральноазиатского региона, совместно использующих бассейн Аральского моря, в основном реки Амударья и

Сырдарья (рис. 2), в настоящее время можно выделить общие черты развития, представленные ниже.

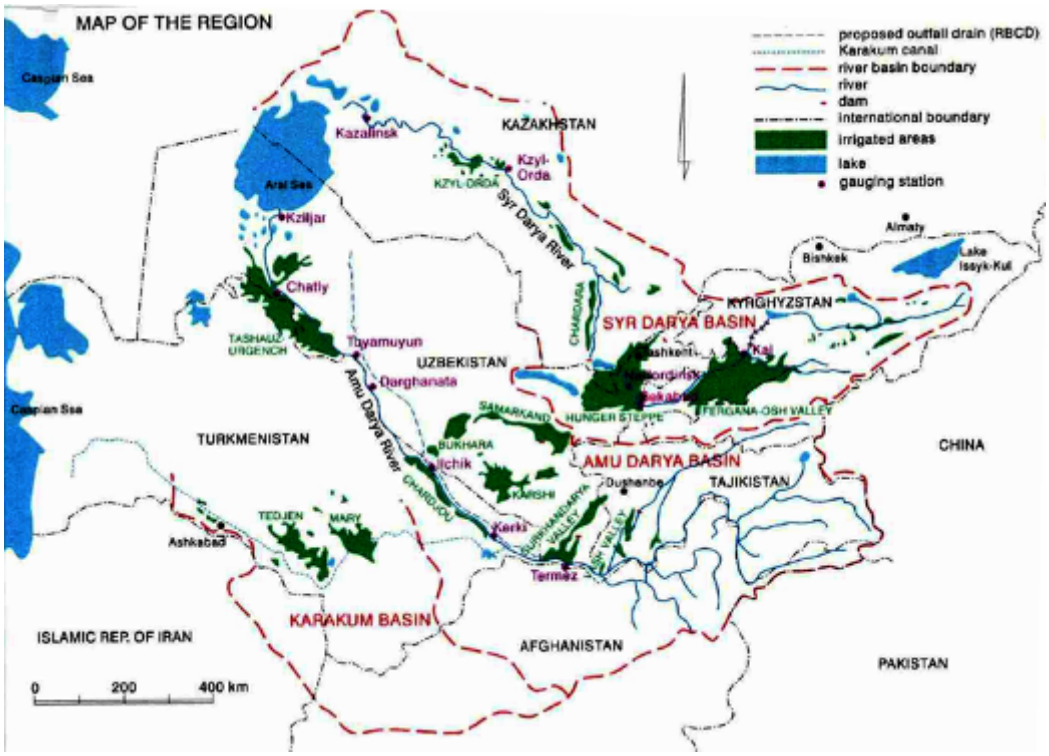


Рис. 2. Страны Центральной Азии, бассейны Амударьи, Сырдарьи и Аральского моря

Все страны региона, но в разной степени и в разных направлениях, утратили в значительной степени свой производственный потенциал в результате приватизации, проводимой без надлежащей законности, социальной справедливости или экономической эффективности, и превратившейся в растаскивание создаваемых десятилетиями производственных мощностей. Другая сторона снижения производственного потенциала связана с невниманием к восстановлению производственных систем и необходимости предотвращения их износа и неисправного состояния посредством капвложений и технологических инвестиций и, сверх того, путем усиления человеческого потенциала.

Главное внимание руководящих органов было направлено на те отрасли промышленности, которые базируются на использовании невозобновляемого природного потенциала (нефти, газа, полезных ископаемых), при этом, с игнорированием подходов, которые могли бы уравновесить изъятие ресурсов посредством альтернативной деятельности или инвестиций для компенсации ущерба и сохранения ресурсов для будущих поколений. Кое-где усиленное расходование запасов углеводородного сырья позволяет получение огромных прибылей в этих отраслях, в малой доле направляющихся на поддержание запасов и добычи, в результате добыча постепенно снижается, свидетельствуя о необходимости как можно усиленнее развивать

изыскательские и технологические работы по вовлечению неизвестных и ныне недоступных резервов. Более устойчивый подход продемонстрирован лишь в двух странах СНГ.

Усиленный отток специалистов, особо из промышленности, науки, системы управления, а также изменение системы обучения, образования и здравоохранения уменьшили и человеческий потенциал в целом в регионе, хотя огромное количество рабочих, работающих вне региона, как бы, на «сезонной работе», способствуют нелегальному и неучитываемому притоку финансового потенциала в регион. (По неофициальной оценке заместителя председателя Госплана Таджикистана В.В. Болотова сотни тысяч граждан республики, работающих на территории Российской Федерации, создают для республики приток средств не менее полмиллиарда долларов в год).

Некоторые опасные тенденции в человеческом развитии таят усиленное перераспределение личных доходов от более или менее равномерного распределения в советский период (коэффициент неравномерности доходов – соотношение доходов 10 % наиболее богатых к доходам 10 % наиболее бедных – не превышал 15-20, ныне этот коэффициент на два порядка выше!!!). В результате растет социальный дисбаланс, утрачивается мотивация к труду, усиливается недовольство, скрытое противостояние «богатых» и «обездоленных», что все вместе разрушает и производственный и человеческий потенциалы.

Проблемы, обозначенные выше, затрагивают сельское хозяйство и село в бассейне Аральского моря, но есть и другие аспекты, которые необходимо проанализировать в отношении сельского и водного хозяйства региона:

- Потеря продуктивности земель в результате нарастающего засоления, заболачивания, вывода земель из оборота и несоблюдения технологических параметров процессов возделывания земель
- Потеря основных фондов строительной индустрии, производства строительных материалов, региональных предприятий, измеряющиеся миллиардами долларов
- Старение и выход из строя сельскохозяйственной, строительной, эксплуатационной техники, что привело к значительному снижению производственного потенциала, необходимого для реконструкции и развития. Если 20 лет тому назад регион обладал возможностью строительства в год до 3000 км горизонтального закрытого дренажа, нескольких тысяч километров лотковых каналов в год, изготавления до 2 млн. м^3 сборного железобетона в год, производства эксплуатационной планировки своей техникой до 1 млн. гектаров в год, уборки машинами до 30 % урожая хлопчатника в целом, а в отдельных областях – до 80 %, то нынешние цифры выглядят смешно или просто представляются ошибочными: строительство дренажа не более 10 км в год, лотковых каналов – 0, изготовление сборного железобетона – 100 тыс. м^3 в год, хлопка машинами собирают не более 10 %, планировку – нечем делать вообще

- Критические изменения человеческого потенциала в кадрах водных специалистов – средний возраст работников более 50 лет; отсутствие квалифицированных кадров в некоторых сферах, а именно в сферах, относящихся к новым технологиям; утрата профессионального опыта возделывания земель вследствие ухода опытных бригадиров в частное мелкомасштабное производство
- Огромное снижение эксплуатационных затрат на управление водой и поддержание ирригационной сети (более чем в 10 раз!), не говоря уже о почти полном прекращении финансирования развития водного и сельского хозяйства. Вместе с тем, нет возможности покрывать эксплуатационные затраты орошения за счет взимания платы с пользователей, поскольку доходы фермеров снижены, а сельское хозяйство в целом получает недостаточное финансирование.

Ситуация, описанная выше, не является ценой, уплаченной за политические изменения. Однако, все это повышает уязвимость этих стран на фоне быстрых и драматичных изменений в мировой экономике и глобализации.

Тенденции в управлении водой

Устойчивость развития определяется возможностью человека поддерживать баланс между природным, человеческим, производственным и финансовым потенциалами и гарантировать их взаимодействие в позитивном направлении. Для достижения этих целей необходимо:

- Наличие мониторинга и информационных систем, которые обеспечивают решающих лиц достоверными показателями динамики развития и подкрепляют решения, исходя из знаний о трендах, направлении изменений и воздействии мероприятий, которые планируется провести, или при их отсутствии
- Безграничность технического прогресса и интеллектуальных способностей человека
- Выявление существующих порогов природного потенциала в отношении самовосстановления и, таким образом, мер, способствующим повторному установлению соответствующего динамического баланса
- Понимание связи и взаимодействия природной, человеческой, производственной и финансовой систем и соответствующих потенциалов, так же как и рамок их использования
- Знание и сопутствующее выполнение мер для достижения потенциальной продуктивности систем природных ресурсов, а также для устойчивого наращивания этой продуктивности за счет динамики прогресса в человеческом обществе
- Наличие обязательных регулирующих общечеловеческих постулатов, правил и норм поведения, которые могут и должны обеспечить разумное

использование всех четырех потенциалов в интересах не только отдельных зон, стран, но человеческого общества в целом.

Каждый из указанных потенциалов состоит из многопланового и разнообразного набора составляющих (таблица 1), наполнение и содержание которых может меняться по мере развития, но баланс основных элементов должен сохраняться.

Таблица 1. Составляющие природного, человеческого, производственного и финансового потенциалов, поддерживающих устойчивое развитие

I. Природный потенциал 1.1. Климат 1.2. Вода 1.3. Земля 1.4. Минеральные ресурсы 1.5. Фауна 1.6. Флора и др.	III. Производственный потенциал 3.1. Промышленность – предприятия 3.2. Сельское хозяйство 3.3. Транспорт 3.4. Связь 3.5. Информатика 3.6. Дороги 3.7. Энергетика 3.8. Строительство 3.9. Водное хозяйство 3.10. Климат для бизнеса 3.11. Приоритеты и др.
II. Человеческий потенциал 2.1. Население – численность 2.2. Образ жизни 2.3. Традиции 2.4. Образование 2.5. Здравоохранение 2.6. Культура 2.7. Религия 2.8. Наука 2.9. Общественные объединения	IV. Финансовый потенциал 4.1. Запасы средств и ресурсов 4.2. Золото и драгоценности 4.3. Деньги 4.4. Займы 4.5. Основные фонды 4.6. Тарифы, пошлины 4.7. Налоги, льготы 4.8. Субсидии

Каждая из указанных составляющих потенциалов находится в процессе постоянных динамических изменений, причем некоторые из них являются негативными: деградация земли, исчерпание минеральных ресурсов, изменение климата *в природном потенциале*; изменение рождаемости, смертности, роста населения, изменение потребностей и стремлений людей и утечка мозгов *в человеческом потенциале*; исчерпание или дефицит средств

в финансовом потенциале; старение основных фондов, торможение технического прогресса, образования и повышения квалификации, наряду с влиянием причин обусловленных другими потенциалами *в производственном потенциале*.

Взаимосвязи между этими потенциалами (таблица 1), их движущие силы, а также тенденции их развития и эффективность этих взаимосвязей определяются тремя главными сферами человеческой деятельности и общества:

- *Политической* формирующей систему государственного контроля, т.е. исполнительная власть правительства, законодательство, правовой режим и юридические нормы, а также систему общественного контроля в гражданском обществе, что определяет *систему руководства*
- *Социальной,* определяющей внутреннее состояние общества и его отношение к будущему – *система социума*
- *Сферой управления* – методы, средства и организационные принципы управления, система наблюдения, сбор и управление данными и контроль за динамикой происходящих процессов, что составляет *систему управления*.

Другими словами, устойчивость развития сфокусированная на личности и обществе определяется:

- Прочностью и правомерностью политической сферы (*руководства*)
- Общественным климатом, характеризующем систему *социума*, создаваемом под действием руководства и развития всех потенциалов, особенно человеческого
- Системой *управления*, которая устанавливается и выполняется на основе предыдущих двух систем и определяет устойчивость и эффективность использования и возобновления потенциалов развития.

Термин «устойчивость» должен пониматься как непрерывный динамизм внутренних и внешних факторов, определяющих эволюцию развития потенциалов, включая интересы будущих поколений.

В регионах с дефицитом воды (Pereira *et al.*, 2002), вода является наиболее важным элементов, связанным со всеми потенциалами:

- Основным ресурсным элементом в природном потенциале
- Элементом потребления в человеческом и производственном потенциалах
- Элементом, определяющим использование финансового потенциала
- Обеспечивающим элементом в человеческом, природном и производственном потенциалах
- Элементом, увязывающим все системы развития.

Итак, вода является необходимым элементом для устойчивости природного потенциала. Во-первых, климат является определяющим фактором,

и его колебания отражаются на водопотреблении, на динамике водных ресурсов, возникновении паводков и засух, но в какой-то степени и водоемы, включая искусственные, влияют на климат. Во-вторых, наличие водных объектов и их режим определяют ландшафт, включая устойчивость фауны и флоры. *Баланс* может быть обеспечен только при удовлетворении экологических требований на воду в речных бассейнах. Ситуация с Аральским морем не должна повториться, она представляет чрезвычайное испытание для всех стран бассейна. Для соблюдения подобных требований требуется определенная политическая воля и руководство: правительства должны четко на уровне межгосударственных договоров и внутригосударственных законоположений и регулирования установить порядок соблюдения этих требований, определенные пороги водопользования и механизмы контроля и наблюдения.

Роль руководства

Наиболее важная сторона *руководства* – влияние на идеологию общества, создание такого климата социума, в котором с раннего детства, на всех уровнях образования будет воспитываться невозможность нарушения природных процессов, святость уважения к воде – в некоторой степени, это возврат к прошлым традициям в отношении к воде и общественному климату, которые мы утратили за время советского государства и продолжаем терять сейчас, когда рыночные отношения толкают к признанию экономической ценности воды в ущерб социальной, экологической и культурной.

Роль *руководства* в использовании и развитии водных ресурсов уже видна из необходимости соблюдения требований природного комплекса. Но еще более, роль руководства важна в обеспечении и регулировании взаимосочетания других потенциалов с природным. Составляющие человеческого потенциала – численность, образ жизни, образование, традиции и состояние здравоохранения, наука являются определяющими отношения правительств и общества к расходованию, развитию, сбережению и поддержанию водных ресурсов. Это отношение также зависит от политической ориентации общества, его нравственных и правовых рамок.

Общественный климат пяти центральноазиатских стран, хоть он и имеет культурные и политические различия, в целом, пока мало ориентирован на водосбережение и технологии экономии воды, на восстановление старинных (досоветских) традиций общего участия в водном хозяйстве и управлении водой. Особый пробел, распространенный сейчас почти повсюду, это сохранение невнимания к воде в области образования и необходимость выработки специальных информационных и образовательных программ в этом направлении. Тем не менее, сейчас мы пытаемся их развить и надеемся на помощь доноров. Значительна важность восстановление былого престижа, которым пользовалась деятельность, связанная с водой в прежние времена: по положению во властных структурах общества мира-

бы[35] занимали посты на втором, а иногда и на первом уровнях в государственном управлении – первый визирь[36] и главный мираб. Например, Алишер Навои, известный средневековый поэт и государственный деятель, занимал эти посты. В наши дни специальность ирригатора не пользуется былой популярностью, это же произошло с деятельностью водников. Задача восстановить авторитет этой профессии. Однако восстановление престижа не означает возврат в прошлое, прежде всего это воссоздание понимания роли управления водой в регионах, испытывающих дефицит воды.

Производственный потенциал – крупнейший потребитель воды, оказывающий наиболее заметное влияние на ресурсы, в том числе в отношении создания водной напряженности в дельтовых экосистемах. Чтобы поддерживать эффективное использование воды в производстве требуется четкая национальная водная политика, предусматривающая такие меры, как субсидирование водного хозяйства, поддержка управления водой, регламентирование работы водохозяйственных органов и их взаимоотношений с водопользователями. Наконец, отношение государства к интегрированному управлению водными ресурсами (ИУВР) чрезвычайно важно, также как и к техническому совершенству систем водопользования, к соблюдению установленных норм использования воды и применению стимулов, направленных на совершенствование водопользования. Особо важна роль государства в создании организационных базы для внедрения ИУВР, обеспечении прозрачности водохозяйственной политики и отказа от административного давления. Эта поддержка со стороны государства рациональному использования и развитию водных ресурсов необходима при создании фундамента для эффективного управления и соответствующего климата для общественного участия (рис. 3).

Роль руководства очень важна при создании эффективной инфраструктуры управления, спроектированной для контроля водопользования и управления требованиями на воду. Для этого нужны финансовые, модельные, правовые и технические инструменты – включая внедрение блочной системы оплаты воды, поощрения за экономию воды, оснащение водопользователей водомерами и создание консультационной службы для водопользователей. У нас не очень много таких примеров в регионе, хотя только внедрение обычной платы за воду в Казахстане, Киргизии, Таджикистане уже способствовало существенной экономии воды.

---

[35] *Мираб* – публичное должностное лицо, отвечавшее за управление водой в Центральной Азии до прихода Советской власти.

[36] *Визирь* – премьер-министр в средневековых центральноазиатских странах

Рис. 3. Условия сбережения природных ресурсов и устойчивого водопользования

Роль общества: общественное участие

Отказ от административного управления водой сверху донизу, свойственного бывшей командной системе СССР, и переход к рыночной экономике с ее обилием водопользователей требует расширенного вовлечения общества в управление водой на всех уровнях водохозяйственной иерархии.

Если на нижних уровнях иерархии в орошении, водоснабжении эту роль могут взять на себя ассоциации водопользователей (АВП/ОВП) или коммунальные и общественные организации, то на верхних уровнях – главный канал, большая оросительная система или бассейн – необходимо соответствующее организационное построение для сочетания усилий государства и заинтересованных субъектов, направленных на улучшение водопользования. Сюда относятся Комитеты бассейнов на уровне бассейнов, Комитеты оросительных систем (или каналов) на уровне каналов. В целом эти организационные изменения уже начаты и ведутся в регионе, но в разных странах в различающейся форме. Таким образом, здесь предстоит большая

работа по вовлечению общества в реформирование водного хозяйства, которая должна поддерживаться государством, но инициировать ее должны специалисты водного хозяйства; ни государство, ни общество не увидит эти нужды без опыта водников.

Обществу нужно привить дух водного партнерства, новое отношение к оценке воды, уважение к этому ограниченному природному ресурсу, и внедрить надлежащие эффективные формы общественного участия. Это также является частью задачи развития демократии.

ИУВР как механизм управления

ИУВР должно объединить такие взаимоувязанные элементы интеграции, как воздействие, контроль и гармонизация многоуровневых, многоотраслевых и многоцелевых процессов водопользования, обеспечивающих многосторонние интересы заинтересованных лиц (стейкхолдеров). Этот механизм имеет несколько инструментов:

- Организационный – бассейновый и гидрографический подход с активным участием водопользователей
- Юридический – защита прав каждого водопотребителя на равное, справедливое и гарантированное получение воды, но при выполнении определенных обязанностей
- Технический – водосбережение как основа для достижения максимальной продуктивности воды; внедрение сети консультативных служб
- Управленческий – управление не только водой, но инфраструктурой и требованиями на воду
- Информационный – открытость, доступность и реальность проектов.

Нынешние первые попытки внедрения данного подхода на примере проекта ИУВР Ферганской долины (SDC – IWMI – НИЦ МКВК) показывают, что это реально достижимая задача.

Будущее речных бассейнов

Хотя мы рассматриваем Центральную Азию как единый регион, однако нельзя забывать, что речь идет о пяти отличающихся странах с трансграничными водными ресурсами (а в будущем и о шести, учитывая, что Афганистан также является частью бассейна Аральского моря). Они имеют совершенно разные подходы, тенденции, потенциалы и приоритеты развития, также как и особый характер политического руководства и социальной среды.

Если все центральноазиатские страны – бывшие республики Советского Союза – в 1990 г. имели приблизительно одинаковый показатель производственного, человеческого и финансового потенциалов, то ныне новые независимые страны имеют огромные различия в экономическом и соци-

альном развитии, также как и политической сфере (см. главу 2). Это четко проявляется в размерах капиталовложений в водное хозяйство в Казахстане и в Таджикистане. Соображения в отношении руководства и использования (производственного, природного и финансового) потенциалов определяют особенности развития природных ресурсов. Недостаток углеводородного сырья определяет приоритет гидроэнергетики для Киргизстана и Таджикистана, ограниченные земельные ресурсы в орошении и огромная демографическая нагрузка в сельской местности при земледелии как основном источнике благополучия оправдывают интенсивное развитие орошаемого земледелия в Таджикистане и Узбекистане в государственных и частных экономических интересах.

Сегодня ясно, что не менее важное значение в возможности выживания региона на собственных водных ресурсах, чем технический уровень водопользования, имеет система управления этим природным ресурсом. Потери водного ресурса и потери продуктивности воды в отраслях водопользователях из-за слабой управляемости намного превышают технические потери воды в руслах, оросительных системах, в хозяйствах и на полях.

Главная цель управления – добиться гарантированной, стабильной подачи воды водопользователям в нужное время и нужного качества, одновременно обеспечив нужды природы в воде и, в случае дефицита воды, равномерную и равноправную доставку воды. Но это вроде простая цель требует очень большой работы по совершенствованию существующей системы управления.

Совершенствование системы управления на бассейновом и межгосударственном уровнях должно включать:

- Четкое прогнозирование стока рек в годичном, сезонном и оперативном плане и обеспечение водохозяйственных органов стран, бассейновых организаций и крупных водопотребителей информаций о текущих расходах воды в реках
- Выработку и юридическое закрепление правил управления водохранилищами в нормальных (средних по водности) и в экстремальных (в условиях паводков и маловодья) условиях
- Выработку и юридическое закрепление правил вододеления между странами и взаимодействия региональных и национальных органов в обеспечении согласованных объемов забора воды из трансграничных рек
- Вовлечение водопользователей в управление бассейнами путем создания Советов бассейнов с последующим переходом их в органы гидроэкологического управления бассейнами
- Подготовку и обязательное выполнение странами региона обязательств по совместному финансированию региональных и бассейновых мероприятий, по обеспечению гидрометеорологического обслуживания, поддержанию зоны формирования стока, совместному управлению и охране водных ресурсов, подготовке совместных проектов по компенсации за-

трат на ремонт, поддержание и модернизацию сооружений регионального значения.

Учитывая специфику гидрологических характеристик стока рек Сырдарьи и Амударьи и их большую зависимость от объема формирования и графика поступления возвратных вод, особое внимание должно быть уделено управлению трансграничными возвратными водами – режиму их формирования, зависящему от практического осуществления водоподачи и от других факторов, таких как содержание в них солей и других загрязнителей, и контролю за попусками и их использованием. Более того, должно точно прогнозироваться количество и доля вод, которые должны использоваться из них на месте формирования и после сброса в крупные реки.

Особый аспект – резервирование этих вод для увлажнения ветландов и пополнения озер в дельтовых системах рек Сырдарья и Амударья с тем, чтобы поддержать рыбопродуктивность таких водоемов, как озера Соленое, Денгизкуль, Арнасай, Айдаркуль, Сарыкамыш, Междуреченское. Для этого следует разработать правила, положения и нормы с учетом необходимости соблюдения экологических попусков для обеспечения экологических требований русел, пойм и дельт.

Большая работа должна быть проведена для увязки потребностей гидроэнергетики и орошения. В дополнение к ранее обозначенным положениям в Соглашении 1998 г., здесь наметился организационный инструмент в виде создания водно-энергетического консорциума, с соответствующими финансово-экономическими механизмами компромиссов между водным и энергетическим секторами.

Водопользователи должны участвовать в бассейновом управлении. В регионе уже 15 лет работают два Бассейновых водохозяйственных объединения (БВО) – БВО «Сырдарья» и БВО «Амударья». Сейчас эти органы постепенно получают усиление в техническом плане (например, внедрение системы SCADA, совершенствование средств гидрометрии). Однако БВО сохранили чисто профессиональный характер узко специализированной команды с очень недостаточной прозрачностью и информативностью.

Создание при БВО бассейновых общественных советов должно способствовать созданию условий для справедливого и равноправного вододеления, открытости и прозрачности управления водными ресурсами и взаимного обмена информацией между основными заинтересованными субъектами региона. В состав подобных трансграничных общественных органов будут включены представители всех областных муниципалитетов, крупных ГЭС, водохозяйственных систем, представители органов охраны природы сопредельных стран, и особо дельтовых регионов. Одновременно члены Совета Бассейна должны рассмотреть целесообразность преобразования управления водой в бассейне в более комплексное управление природным комплексом, вовлекая всех заинтересованных в соответствующее решение вопросов развития и привлечения финансовой поддержки.

Выработка национальной водной политики на основе руководства и нового отношения общества

Хотя регион явно находится на подходе к пределу водного дефицита – 1700 м^3/чел. в год, понимание этой ситуации еще не достигнуто ни руководством, ни обществом. Грядущее поколение, которое займет лидирующую роль через 20-30 лет, когда в регионе будет всего по 1200-1300 м^3/воды на человека, должно быть подготовлено к экономному расходованию и использованию этого важнейшего природного ресурса. Сбережение и экономия воды являются необходимыми элементами решения проблемы дефицита воды (Pereira *et al.*, 2002). Поэтому первоочередной задачей Центрально-Азиатских государств является воспитание детей и подростков в духе древних традиций уважения и святости воды, тем самым создавая условия для эффективного внедрения сбережения и экономии воды. Подобные навыки должны прививаться с раннего детства. Будущее поколение должно обладать умением продуктивно управлять орошаемыми землями. Поэтому, былая традиция приоритета водного развития в регионе, привлечения выдающихся водников в структуры руководства государством (как это было в эпоху Аль Хорезми и Навои) сможет помочь организовать нужную направленность руководства и политической линии, соответствующие новому времени, а не просто возрождению прежних традиций.

Правильная водная политика государств базируется на понимании обществом ограниченности водных ресурсов и их динамики, а также на сбережении и экономии воды. Среди прочих (Pereira *et al.*, 2002), следующие мероприятия могут способствовать правильной водной политике:

- Формирование законодательной и организационной основы ИУВР
- Вовлечение водопользователей в управление
- Развитие стимулов для практики сбережения и экономии воды
- Капитальные вложения в развитие водного сектора
- Создание инфраструктуры и консультативной службы, необходимых для рационального водопользования
- Формирование развернутой, ориентированной на «водные» вопросы, сети тренинга и обучения специалистов.

Формирование ИУВР в стране не должно ограничиваться переходом на гидрографическое и гидрологическое управление как это представляют отдельные руководители. Главная задача во внедрении ИУВР - социальная мобилизация водопользователей и специалистов водохозяйственных организаций посредством реализации подхода общественного участия, вовлекая их в работы, выполняемые АВП, комитетами каналов, советами системы и водохозяйственными советами страны.

Нельзя допустить, чтобы эти новые организационные формы участия «стейкхолдеров» превращались в придаток водохозяйственных организа-

ций – они должны приобрести самостоятельность: и организационную, и финансовую, и управленческую. Образцами общественного управления полна мировая практика (Abernethy, 2001), в основном, в развитых странах, где финансовые возможности водопользователей достаточно велики, и государство участвует в этих общественных органах, как главный партнер, с достаточно большой долей вклада (Correia, 1997; Европейская Комиссия, 2000).

Однако, и традиционные формы общественного участия в использовании и управлении водными ресурсами со времен древнего Туркестана демонстрируют также немало положительных традиций в виде институтов *мирабов* и *арык-аксакалов*[37]. Они отвечали не только за обеспечение справедливого и разумного вододеления, водоподачи и контроля за водными ресурсами, но и за организацию материального участия пользователей во всех эксплуатационных, строительных и ремонтных работах в виде водных *хашаров*[38], привлечение средств, а при их дефиците – за обязательное участие трудом, материалами, тягловой силой и др.

В нынешних условиях задача общественного участия – постепенно перенести с государственных водохозяйственных управлений на плечи водопользователей ответственность за планирование, равноправное распределение воды и доставку воды. Если иметь в виду, что на каждой системе, на каждом канале количество водопользователей достигает нескольких сотен, а в отдельных АВП в Кыргызстане, например, их число множится до нескольких тысяч, то понятно, что только активная роль фермеров в формировании групп внутри АВП по каждому каналу, выработка очередности и порядка водооборота, увязка его с порядком подачи воды в головах каналов сможет сделать реальной задачу стабильной, устойчивой и равномерной подачи воды водопользователя именно тогда, когда это им нужно. Более того – именно сами фермеры, организуя контроль за рациональным использованием воды у каждого из членов АВП, предотвратят несправедливость вододеления, тем самым создавая условия для экономии воды, гарантированного водообеспечения всех пользователей и одновременно снижения финансовой нагрузки на управление водой.

Увязка интересов водопользователей и водохозяйственных организаций имеет большое значение с позиции их единства в экономном и рациональном использовании воды. Здесь опять таки велика роль соответствующей национальной водохозяйственной политики и национальных инструментов управления водой. При нынешней системе бесплатного водопользования как в Узбекистане ни водопользователи, ни водохозяйственные организации не заинтересованы в экономии воды и не имеют взаимных обязательств по водоподаче. При введении платы за воду (Казахстан, Киргизстан, Таджикистан) появилась прямая заинтересованность в снижении переборов у водопользователей с целью экономии затрат на орошение. Эта

---

[37] *Арык-аксакалы* – старшие смотрители распределительных каналов на уровне общин

[38] *Хашары* – обязательные коллективные общественные работы

заинтересованность возрастает при оплате штрафных санкций за переборы воды, особенно если эти оплаты идут по прогрессивной шкале. Однако водохозяйственные органы, если для них установлена прямая оплата за воду, могут быть заинтересованы в том, чтобы дать больше воды водопользователям, что является противоречием, которое следует избегать.

Решение этой проблемы может быть найдено при определенной системе взаимной заинтересованности и водопользователей и водохозяйственных организаций в повышении продуктивности воды, например, при выдаче эксплуатационникам ирригационных систем премии при условии, если они обеспечивают приближение к потенциальной продуктивности воды. Другим решением может быть выплата водохозяйственным организациям финансовой компенсации за водосбережение, делающее водные ресурсы доступными для других водопользователей, аналогично тому, что практикуется в таких регионах, как Калифорния, где за экономию оросительной воды платят муниципальные пользователи низовьев. Этот подход существенно повышает заинтересованность пользователей и водохозяйственных организации во внедрении передовых технологий.

Вопросы орошения

Результаты научно-исследовательского проекта, представленные в данной книге, относятся к некоторым техническим вопросам орошения, включая методы и модели расчета требований культур на воду и на орошение, модели для создания, анализа и обоснования режимов орошения, средства ГИС и дистанционного зондирования, модели и техника поверхностного полива, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик полива на уровне хозяйств, и системы поддержки принятия решений (СППР), объединяющие эти модели и базы данных, которые будут использоваться на разных уровнях, от хозяйства до вододеления. Проведенное исследование было нацелено на адаптацию или развитие модельных инструментов и на развитие СППР, которая будет использоваться в будущем. Внедрение этих инструментов в практику и разработка неотъемлемых вспомогательных средств, облегчающих принятие и использование этих инструментов представляет большую задачу.

В свете этого, в параллельном проекте предусматривается крупномасштабное внедрение системы паспортизации полей в практику орошаемого земледелия. Для этого требуется адаптация ее на всей площади орошения, дальнейшее развитие инструментария и распространение знаний для внедрения соответствующих приемов, которые будут усвоены водопользователями и техническим персоналом, способным извлечь личную выгоду от предлагаемых инноваций.

В настоящее время можно наметить следующие этапы в этом широкомасштабном внедрении подобных инновационных подходов:

- Повсеместная паспортизация полей и фермерских хозяйств на основе детального почвенно-мелиоративного обследования с применением дистанционных методов и ГИС, особо выявление причин неравномерности урожая и его недоборов. Это позволит фермерам и консультантам оценить современную продуктивность земли и воды, наметить краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные меры, которые могут гарантировать достижение или приближение к потенциальной продуктивности земли
- Эта работа должна сопровождаться освоением модели WINISAREG для моделирования и выбора подходящего режима орошения, включая ее версию в ГИС GISAREG. Это позволит получить откорректированные нормы и сроки полива с использованием фактических метеорологических данных
- С помощью СППР SADREG осуществляется выбор передовых методов поверхностного орошения, в основном по улучшению распространенных в настоящее время систем полива по бороздам, в сочетании с режимами полива, сгенерированными ISAREG. Критерии для выбора задаются пользователем и включают эксплуатационные характеристики полива, а также экологические и экономические характеристики
- Для лучшей увязки целей фермерских хозяйств и задач системы подачи воды, может быть использована СППР SEDAM, также работающая в ГИС, для составления сценариев спроса и подачи оросительной воды. В настоящее время полезно проанализировать и подкрепить решения по основным направлениям изменения. В последующем, ее необходимо модифицировать для работы в режиме реального времени и, следовательно, для поддержки решений по управлению каналами. Это предполагает увязку SEDAM с имитационной моделью водоподачи, описанной Духовным и Тучиным в главе 17
- Указанные выше инструменты могут оказать помощь в деятельности АВП, в частности при составление планов водоподачи и консультировании фермеров, а также обеспечить поддержку взаимодействий АВП и Водных комитетов каналов
- Оснащение сети каналов старшего порядка системой SCADA, а всех водовыделов в распределители и в хозяйства гидрометрическим оборудованием, позволяющими осуществлять строгий учет подачи и использования воды
- Параллельно должно быть организовано обучение персонала АВП и водопользователей методам применения указанных моделей, использования оборудования для контроля водоподачи и совершенствования своей работы
- Организация на уровне АВП или в целом на уровне системы консультативных служб, которые создадут базу для внедрения инноваций на основе демонстрационных участков и сети экспертов-консультантов, оказания систематической помощи фермерам во внедрении передовых приемов, адаптированных к данным условиям; использовании удобрений и

материалов в соответствии с сельхозпотребностями и экологическими требованиями; подбору районированных и надежных сортов сельхозкультур; борьбе с вредителями и болезнями растений; маркетингу и рекомендациям по оптимальным стратегиям земле- и водопользования
- Создание надежного дренажного фона как основы управления солевым и водным режимом почв, в частности опираясь на знания, накопленные в результате многолетней работы дренажа в Центральной Азии
- При этом, вследствие того, что темпы снижения продуктивности земель в Узбекистане за прошедшие 25 лет составили от 5 % по Ферганской области до 30 % по Каракалпакстану, для исправления ситуации следует создать условия для увеличения инвестиций в поддержание и восстановление дренажа.

Освоение этого инструментария должно быть осуществлено на основе тренинга высшего и среднего звена специалистов водохозяйственных организаций для формирования понимания ими необходимости взаимодействия всех уровней иерархии водного хозяйства в обеспечении стабильности водоподачи до конечного пользователя. Тренинг специалистов управлений каналов и оросительных систем должен быть ориентирован на практическое использование ими предлагаемого модельного механизма и правил водораспределения. Тренинг специалистов АВП должен обеспечить обучение компьютеризации и информационным технологиям адаптированным к их уровню. Наконец тренинг фермеров и работников сельского хозяйства должен быть направлен на вопросы, тесно связанные с методами возделывания сельхозкультур.

Выводы

Ситуация, сложившаяся в странах Центральной Азии, требует дальнейшего совершенствования управления водой в поддержку природного, человеческого, производственного и финансового потенциалов устойчивого развития. Здесь подразумевается признание этих потенциалов и настраивание руководства, *социума* и системы управления на существующие проблемы, в основном связанные с водой. Относительно данного ресурса требуется дальнейшее выполнение работ по разработке модельного и технического инструментария, а также его последующему внедрению в Сектор орошения. Это будет способствовать осуществлению принципов ИУВР. Однако здесь приоритетом является общественное участие, организационное строительство, образование с раннего детства и на всех уровнях и совершенствование работ, проводимых государственными органами.

Библиография

Духовный, В.А., (под ред.) 2004. Дренаж в бассейне Аральского моря в направлении стратегии устойчивого развития. НИЦ МКВК, ФАО ИПТРИД, ЕС “Коперникус”, Ташкент, 315 стр.

Abernethy, C., (Ed.) 2001. Intersectoral Management of River Basins. IWMI, Colombo, 416 pp.

Correia, F.N., (Ed.) 1997. Institutions for Water Resources Management in Europe. Balkema, Ritterdam.

European Commission, 2000. Towards Sustainable and Strategic Management of Water Resources. Study EN 31, European Union, Luxembourg, 323p p.

Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I., 2002. Coping with Water Scarcity. UNESCO IHP VI, Technical Documents in Hydrology No. 58, UNESCO, Paris, 267 pp (http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001278/127846e.pdf).

УПРАВЛЕНИЕ ОРОШЕНИЕМ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПРОЦЕССАМИ ОПУСТЫНИВАНИЯ В БАССЕЙНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ. ОЦЕНКА И ИНСТРУМЕНТЫ

Под редакцией

проф. Л. С. Перейра, проф. В. А. Духовного, инж. М. Г. Хорста

Верстка и дизайн - И.Ф. Беглов и Б.К. Турдыбаев