
Часть 5

ИНСТРУМЕНТЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Глава 17.

РАБОТА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В.А. Духовный²⁸, А.И. Тучин²⁸

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 сдвигку 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.*, 2005а, 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 ($\pm n$ -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 приспособливаться 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, обуславливают 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.

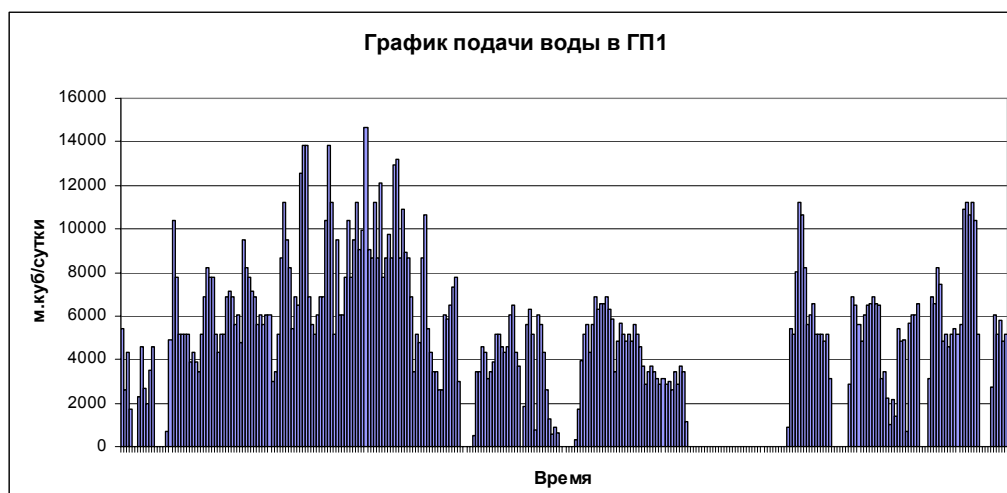


Рис. 1. Фактический режим подачи воды в голове канала С-1, хозяйство «Азизбек-1» Ферганской области

Формулировку задач планирования и оптимального управления подачей водных ресурсов на орошение ирригационной системой начнем с

рассмотрения некоторой территории, ограниченной контуром ∂g , определяющим контур орошения, внутри которой имеется множество $\{J\}$ площадей орошения. На каждой площади возделывается некоторое множество культур $\{R_j\}$, с параметрами:

$$F_{r,j}, q_{r,j}^N(t), \eta_j, j \in \{J\}, r \in \{R_j\}, t \in \{T\},$$

где: $F_{r,j}$ - площадь, занимаемая культурой “r” на площади “j”, $q_{r,j}^N(t)$ - 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 $K = \{0,1, \dots, k\}$ - множество узлов, соответствующих гидротехническим сооружениям, а $C = \{0,1, \dots, c\}$ - 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) , $p \in \{P_c\}$, 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 $\{P_c\} \cap \{P_k\} = \emptyset$, $\forall(c,k), c \in \{C\}, k \in \{C\}, c \neq k$; 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 выполняться неравенство:

$$q^{max} \geq q(x,t) \geq q_p(x,t), \forall L \geq x \geq 0, t \in \{T\}; \quad [1]$$

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:

$$\frac{dq}{dx} = -\lambda \times q; \text{ при } L \geq x \geq 0, \lambda > 0; \quad [2]$$

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:

$$Q(0,t) = q(0, t) \text{ и } q(L,t) = \eta \times q(0,t); \quad [3]$$

получим уравнение расхода в канале для произвольного сечения на расстоянии “ x ” от головы канала:

$$q(x, t) = q(0, t) \times \exp\left(\frac{x}{L} \ln \eta\right); L, \geq x \geq 0; \quad [4]$$

Из уравнения [4] находим связь между расходами в сечениях x_1 и x_2 :

$$q(x_2, t) = q(x_1, t) \times \exp\left(\frac{x_2 - x_1}{L} \ln \eta\right); L \geq x_2 \geq x_1 \geq 0; \quad [5]$$

Расход в голове канала, пользуясь выражениями [4] и [5], найдем при произвольном количестве потребителей $\{P\}$ вдоль его длины:

$$q(0, t) = q(L, t) / \eta + \sum_{p \in \{P\}} [q_p(x, t) \times \exp\left(-\frac{x_p}{L} \ln \eta\right)]; \quad [6]$$

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:

$$q(0, t) = q(L, t) / \eta + \sum_{p \in \{P\}} [q_p(t) \times \eta^{-\left(\frac{x_p}{L}\right)}]; \quad [6a]$$

Интересно отметить, что выражения [6], [6a] 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:

$$q_j^*(t) = \sum_{r \in \{R\}} F_{j,r} \times q_{r,j}^N(t) / \eta_j, \forall j \in \{J\}, t \in \{T\} \quad [7]$$

где: $F_{j,r}$ - площадь, занятая культурой “r” в контуре орошения “j”, $q_{r,j}^N(t)$ - норма водоподачи для культуры “r”, в контуре орошения “j”, η_j - к.п.д. техники орошения в контуре “j”.

Эти требования обеспечиваются работой отводов:

$$q_j^*(t) \geq q_j(t) = \sum_{c \in \{C\}} \sum_{p \in \{P_c\}} q_{p,j}(t), \forall j \in \{J\}, t \in \{T\} \quad [8]$$

Кроме этого заданы требования к транзиту:

$$q_c^*(L,t), \forall c \in \{\text{out}\} \subset \{C\}, t \in \{T\} \quad [9]$$

и доступный гидрограф подачи водных ресурсов в систему:

$$q_c^*(t) \geq q_c(0,t), \forall c \in \{\text{inp}\} \subset \{C\}, t \in \{T\} \quad [10]$$

здесь: $\{\text{inp}\}$ и $\{\text{out}\}$ – источники (притоки) и стоки (оттоки) ирригационной системы, соответственно.

Выполняются уравнения сохранения массы воды в каналах:

$$q_c^{\text{max}} \geq q_c(0,t) = q_c(L,t) / \eta_c + \sum_{p \in \{P_c\}} [q_p(x,t) \times \exp(-\frac{x}{L_c} \ln \eta_c)]; \quad [11]$$

Выполняются уравнения сохранения массы воды в узлах системы:

$$\sum_{c \in C_k^+} q_c(L,t) - \sum_{c \in C_k^-} q_c(0,t) = 0; \forall k \in \{K\}, t \in \{T\} \quad [12]$$

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, $\{T\} = \{0, 1, \dots, t\}$. 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 (А) – 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 (В) – распределить доступные объемы водных ресурсов подаваемые к голове ирригационной системы $q_c^*(t)$, между орошаемыми площадями и транзитом, и удовлетворяющие техническим характеристикам каналов.

Задача (А) 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 (А), можно записать в виде:

$$f(q(t)) \Rightarrow \max_{q(t)} \left(\frac{\sum_{j \in \{J\}} q_j(t)}{\sum_{c \in \{inp\}} \lambda_c \times q_c(0, t)} \right), \forall t \in \{T\} \quad [13]$$

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 (А), означает, что часть каналов функционируют с предельной нагрузкой (т. е. каналы, для которых выполняется равенство в выражении [11]).

На втором этапе (задача (В)) 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:

$$\beta(t) = \frac{\sum_{c \in \{inp\}} q_c^*(t)}{\sum_{c \in \{inp\}} q_c(0,t)}, \beta(t) \leq 1, \forall t \in \{T\} \quad [14]$$

где: $q_c(0,t)$ - результат решения задачи (A), $q_c^*(t)$ - выделенные водные ресурсы.

Вычислим доступные объемы для орошаемых контуров:

$$q_j^{\sim}(t) = q_j^*(t) \times \beta_j(t), \forall j \in \{J\}, t \in \{T\} \quad [15]$$

и введем новую переменную $\delta q_j(t)$:

$$\delta q_j(t) = [q_j^{\sim}(t) - q_j(t)]/F_j \geq 0, \forall j \in \{J\}, t \in \{T\} \quad [16]$$

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 (B):

$$f(q(t)) \Rightarrow \frac{\min}{q(t)} \left[\sum_{j \in \{J\}} \delta q_j(t) \right], \forall t \in \{T\} \quad [17]$$

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 внутrideкадном 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. 2²⁹, 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.

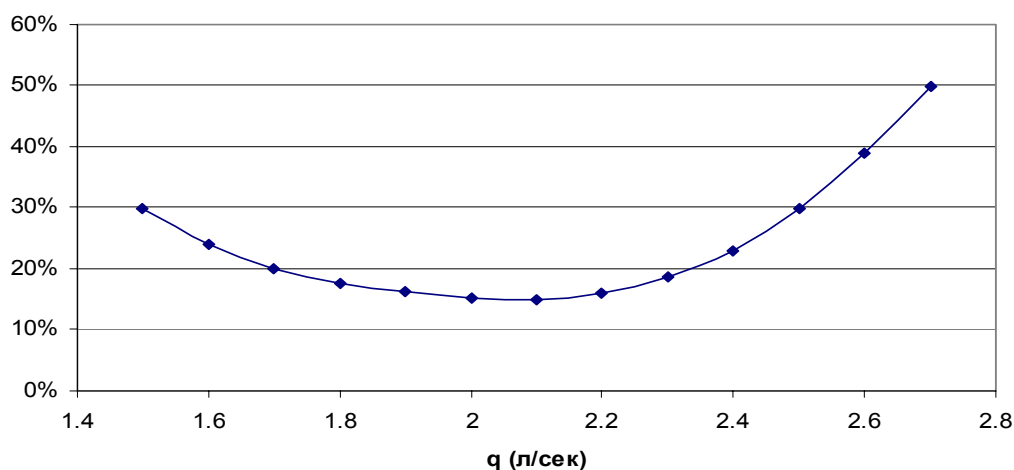


Рис. 2. Потери воды в зависимости от расхода, подаваемого в борозду

Именно в этом приближении опишем динамику одного полива сельскохозяйственной культуры:

$$F_{r,j} w_{r,j}^n = \int_{t \in T_n^r} q_{r,j}(t) \times [\eta_{r,j} - \alpha_{r,j} (q_{r,j}(t) - q_{r,j}^0(t))^2] dt \quad [18]$$

где: "j" – индекс контура орошения, "r" – индекс культуры, "n" – номер полива, $F_{r,j}$ – площадь, занятая культурой, $w_{r,j}^n$ – объем воды, требуемый культурой в период полива "n", $\eta_{r,j}$ – к.п.д. техники орошения, $\alpha_{r,j}$ – коэффициент увеличения потерь при отклонении фактического расхода от установленного техникой орошения, $q_{r,j}^0$ – установленный расход для определенного интервала времени, $q_{r,j}$ – фактический расход, подаваемый в этот интервал времени, T_n^r – период выполнения полива "n".

Уравнение [18] определяет требования со стороны сельскохозяйственных культур, где неизвестными являются: T_n^r , $n = \{0, 1, \dots, N^r\}$ – количество поливов культуры "r" и $q_{r,j}(t) \geq 0$. В соответствии с [18]

трансформируется и уравнение [8]:

$$\sum_{r \in \{R^j\}} q_{r,j}(t) = \sum_{c \in \{C\}} \sum_{p \in \{P_c\}} q_{p,j}(t), \forall j \in \{J\}, t \in \{T\} \quad [19]$$

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:

$$\mathcal{K}(q_{r,j}(\bullet)) = \sum_{j \in \{J\}} \left[\sum_{r \in \{R^j\}} \int_{t \in \{T\}} q_{r,j}(t) \times \alpha_{r,j}(q_{r,j}(t) - q_{r,j}^0(t))^2 dt \right] \rightarrow \min \quad [20]$$

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:

$$W(q_c(\bullet)) = \sum_{c \in \{C\}} \int_{t \in \{T\}} \beta_c \times q_c(t) \times \left[\frac{\partial q_c(t)}{\partial t} \right]^2 dt, \forall j \in \{J\}, t \in \{T\} \quad [21]$$

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.*, 2005а, b), но не было времени протестировать их на данном практическом примере.

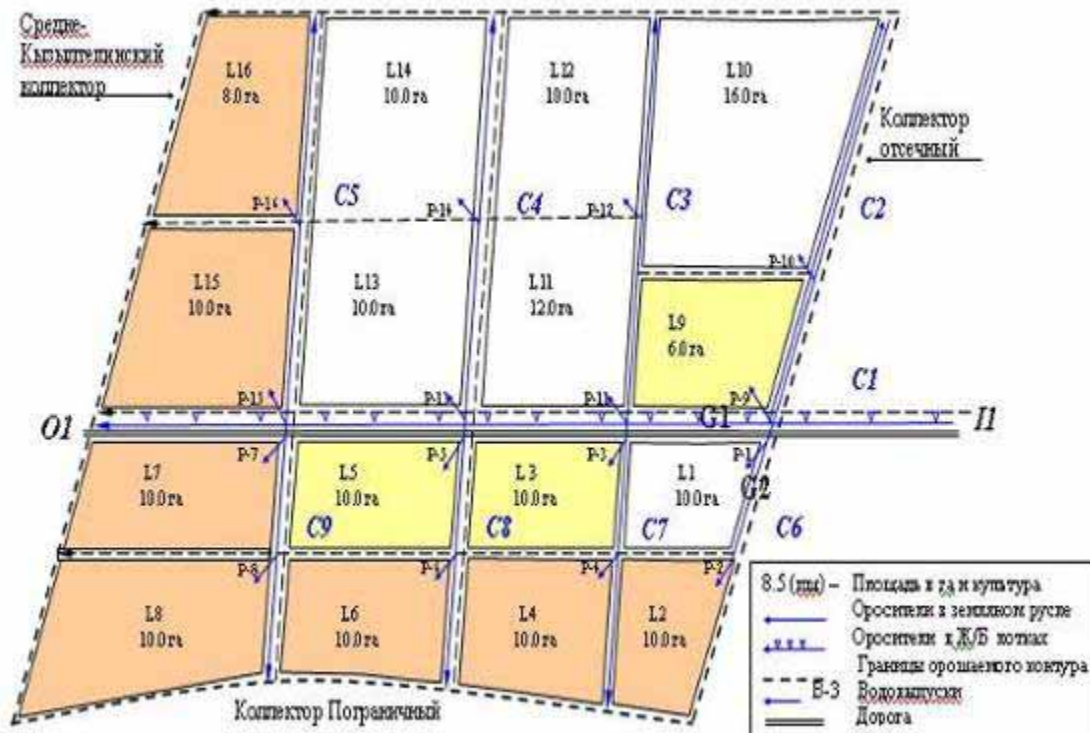


Рис. 3. Схема оросительной сети исследуемого участка

В схеме используются следующие обозначения:

II – приток (в контур орошения); O1 – отток (транзит);

G1, G2 – гидросты; C1-C9 – каналы; L1-L16 – орошаемые поля;

P1-P16 – водоотводы на поля

II – вход (приток в контур орошения); O1 – выход (транзит); G1, G2 – гидросты;

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

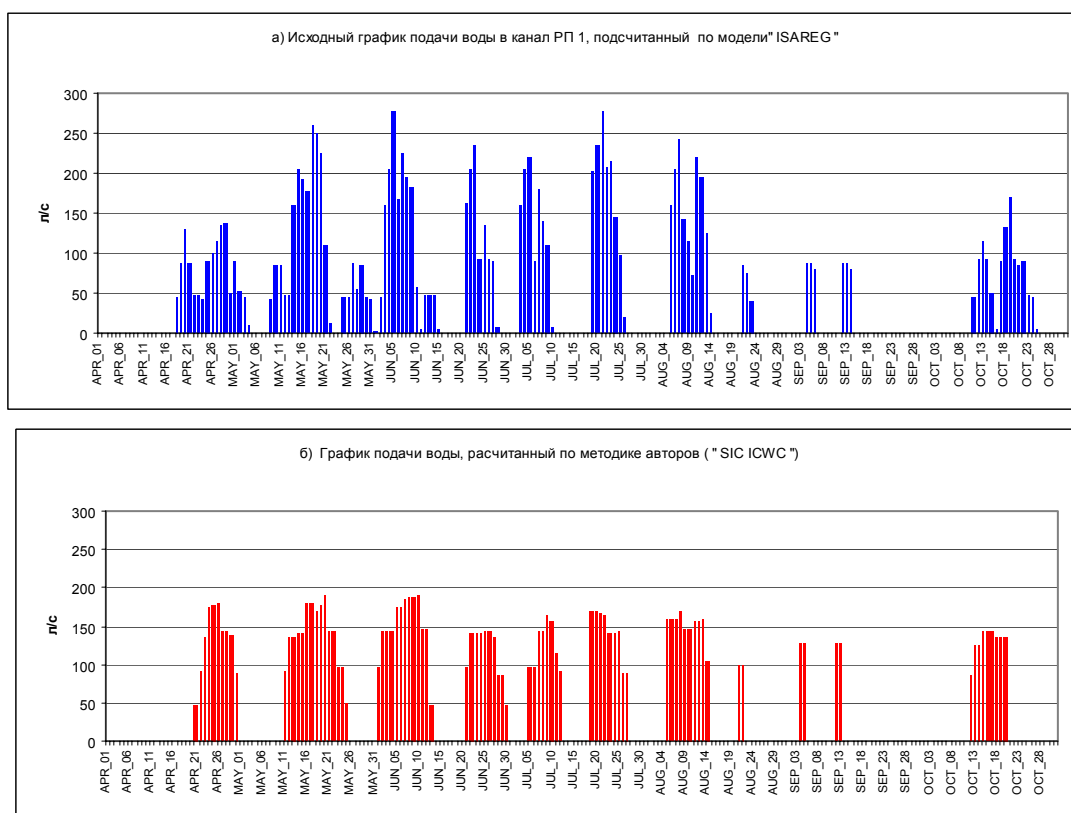


Рис. 4. Результаты моделирования требований на орошение с помощью ISAREG (а) и проведенного НИЦ МКВК с ограничением допустимых расходов до 200 л/с (б) (фактический график представлен на рис. 1)

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 $\pm 5\%$; 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).

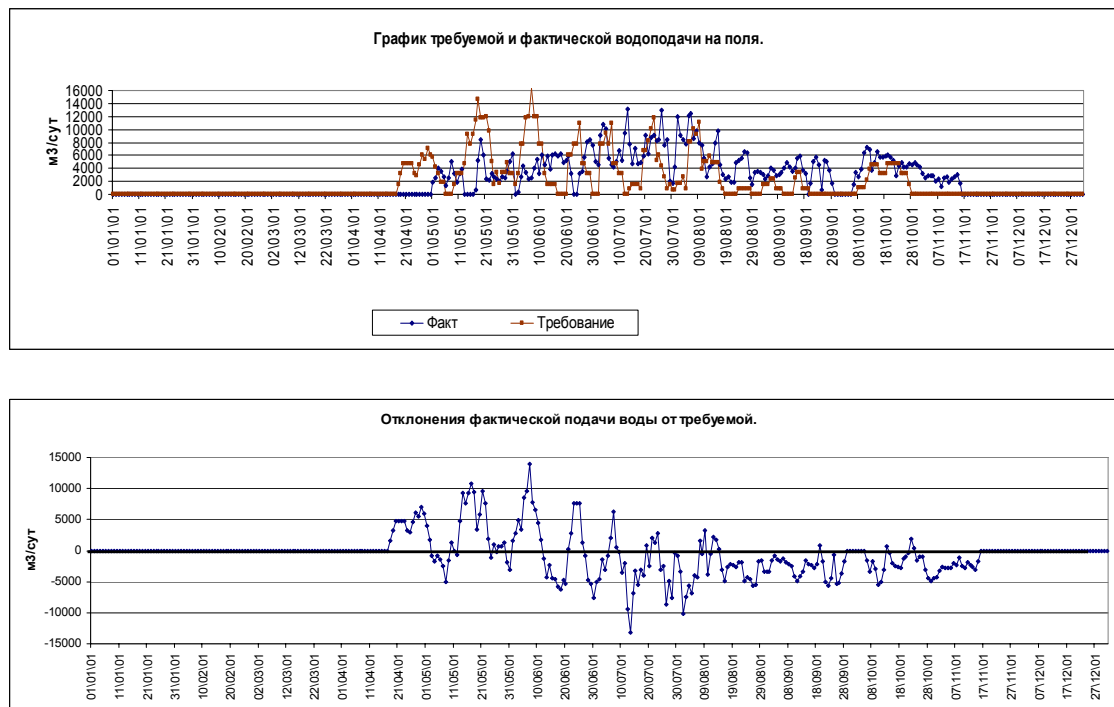


Рис. 5. Вверху: сравнение требуемой и фактической подачи воды ($\text{м}^3/\text{га}$) в канале в течение сезона выращивания хлопчатника, Фергана; внизу: разница между фактической и требуемой водоподачей

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.

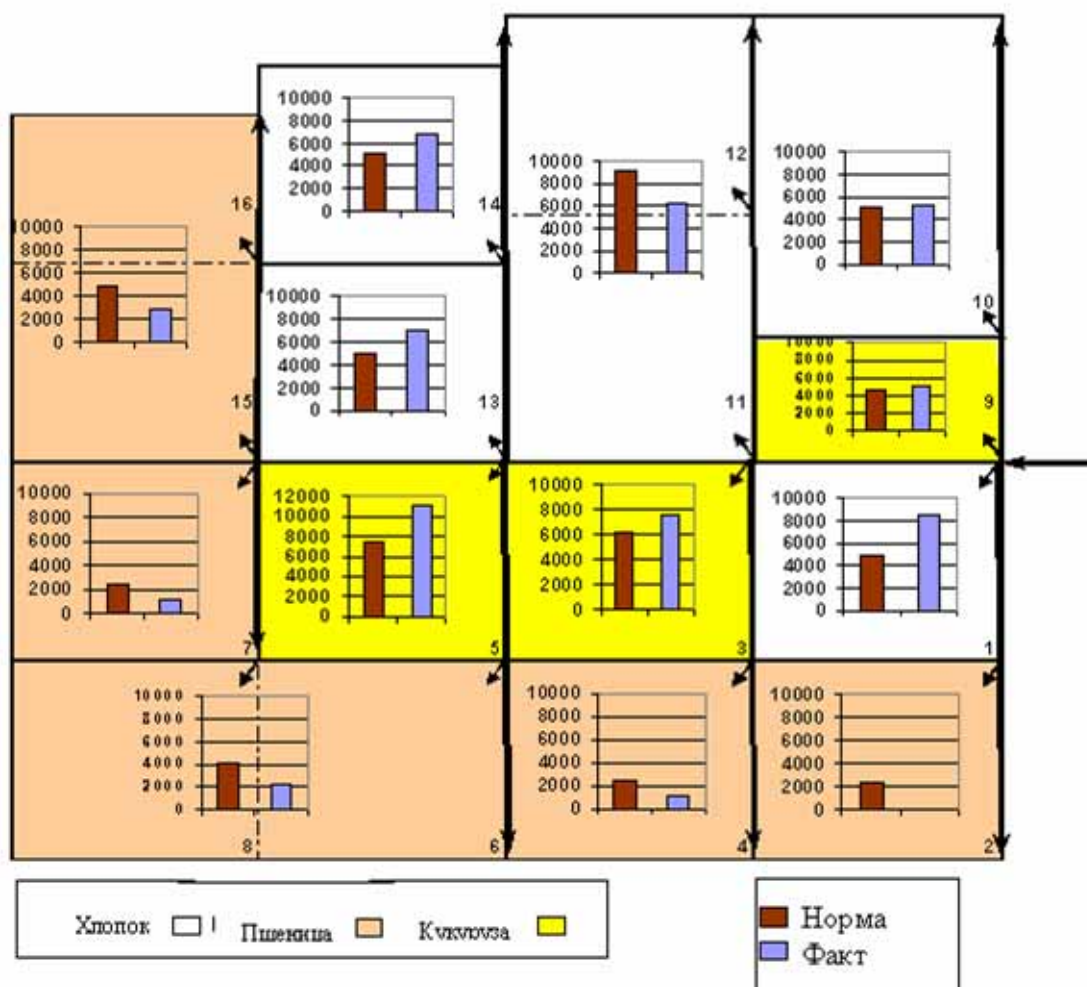


Рис. 6. Требуемые (норма) и фактические (факт) объемы водоподачи ($\text{м}^3/\text{га}$) на поле в течение вегетации хлопчатника (апрель-сентябрь 2001 г) в хозяйстве «Азизбек-1» (поля те же, что и на рис. 3)

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 среднесезонных значений эвапотранспирации и местным почвенным условиям, при потенциальном сбережении 12-15 % от объема водоподачи. Помимо этого, минимизация эксплуатационных потерь, вызванных разьединенностью 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., 2005а. 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. Гонсалвес³⁰, М.Г. Хорст³¹, Дж. Ролим³⁰, А. Муга³⁰

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, дом 11, Ташкент, 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.

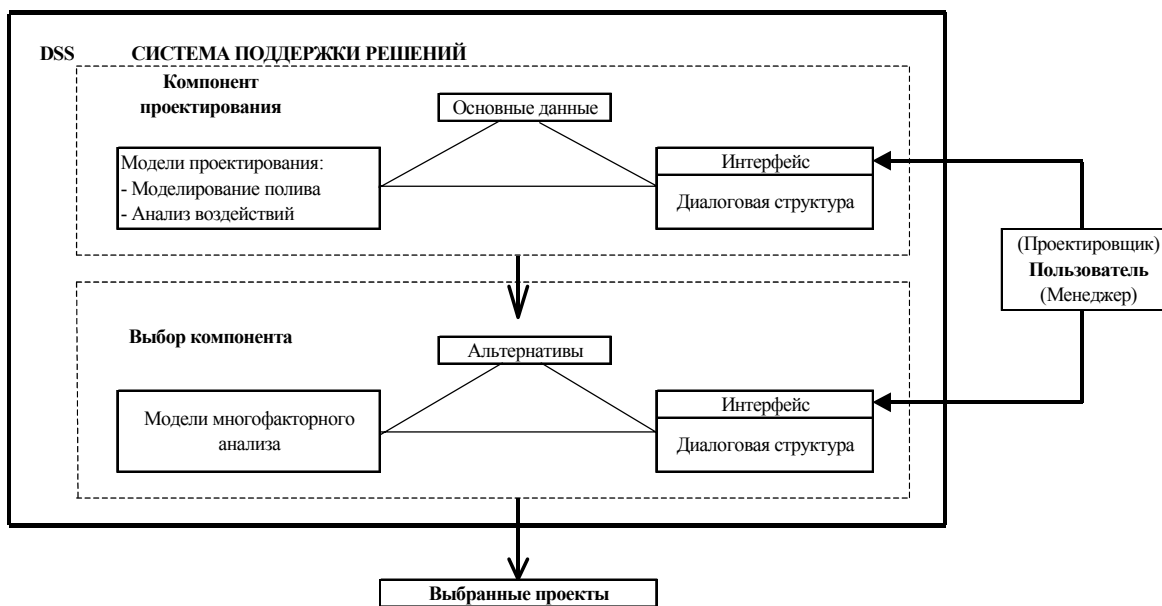


Рис.1. Концептуальная структура SADREG



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 относиться 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.

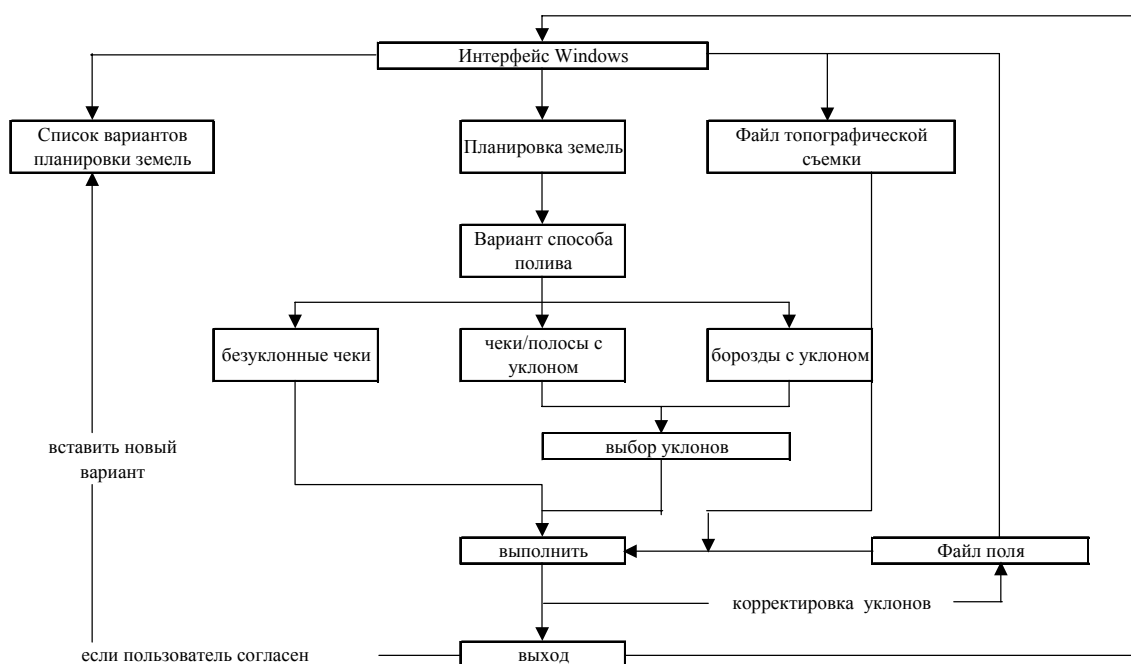


Рис. 3. Блок-схема модуля планировки земель

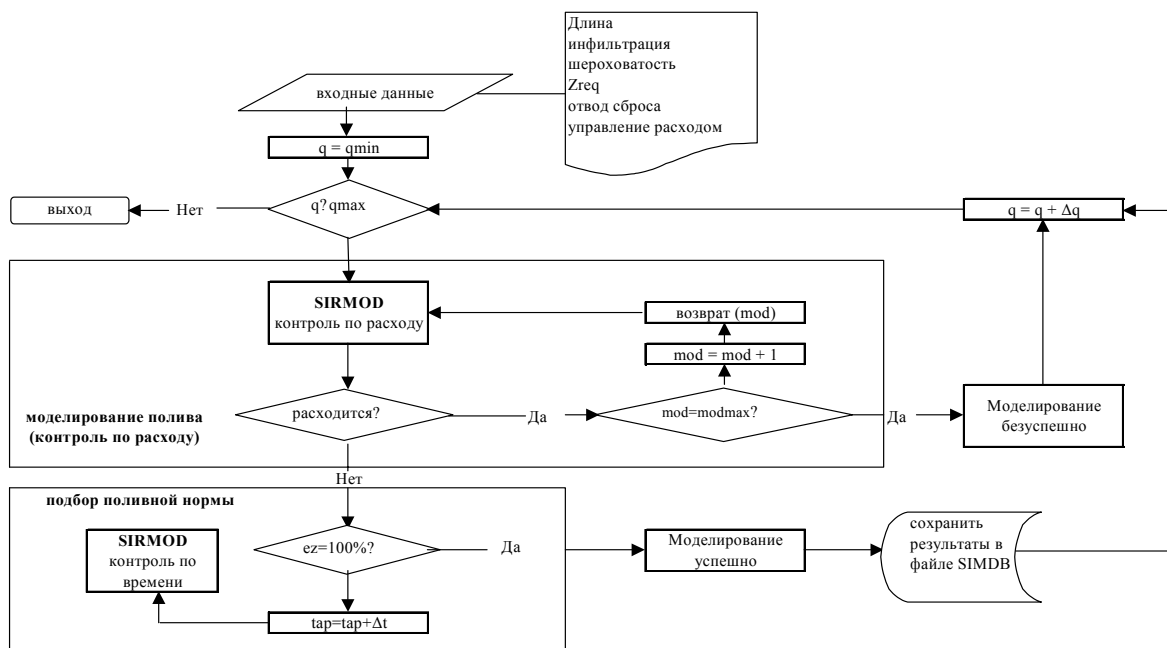


Рис. 4. Блок-схема использования программы SIRMOD

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]** – завершённое 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:

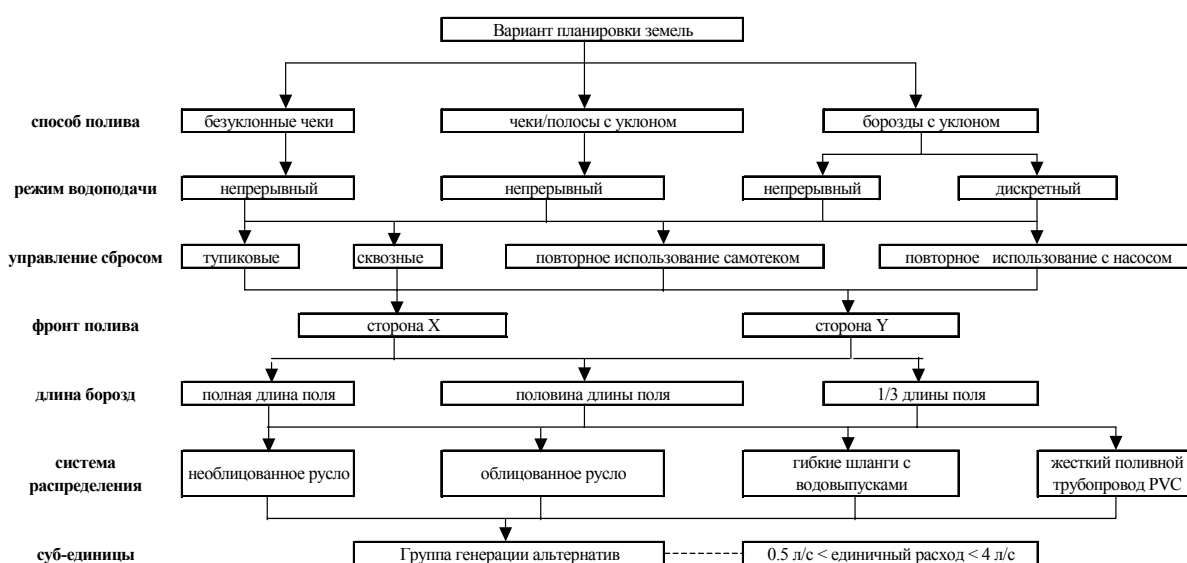


Рис.6. Переменные проектирования в процедуре генерации альтернатив

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)

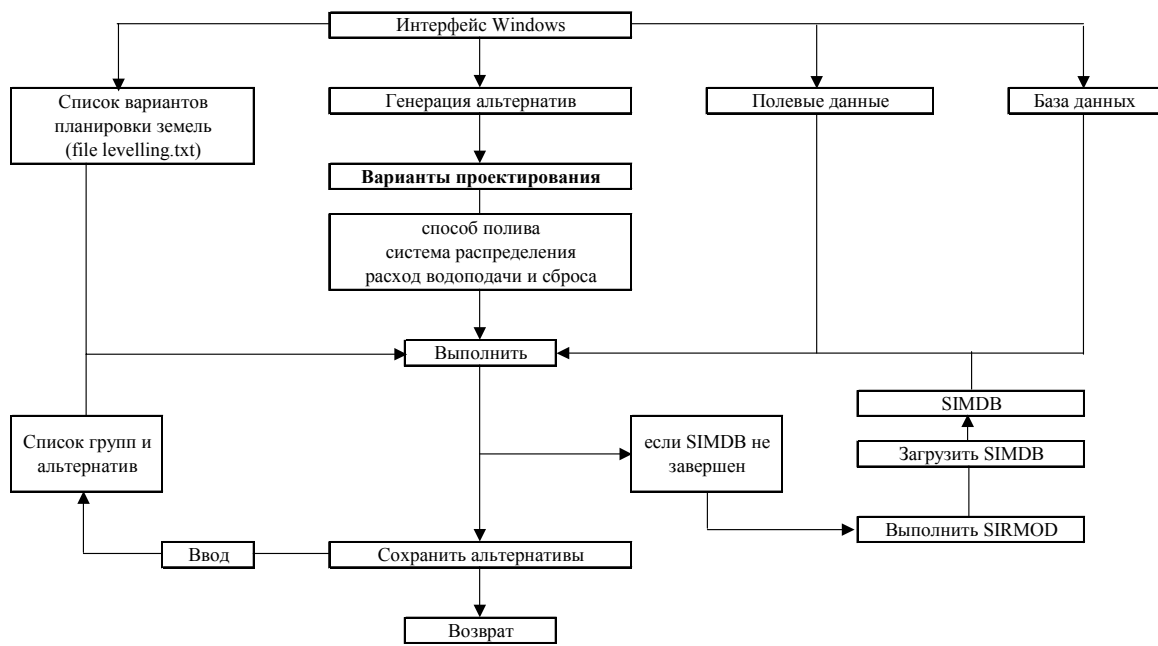


Рис. 7. Блок-схема модуля генератора альтернатив

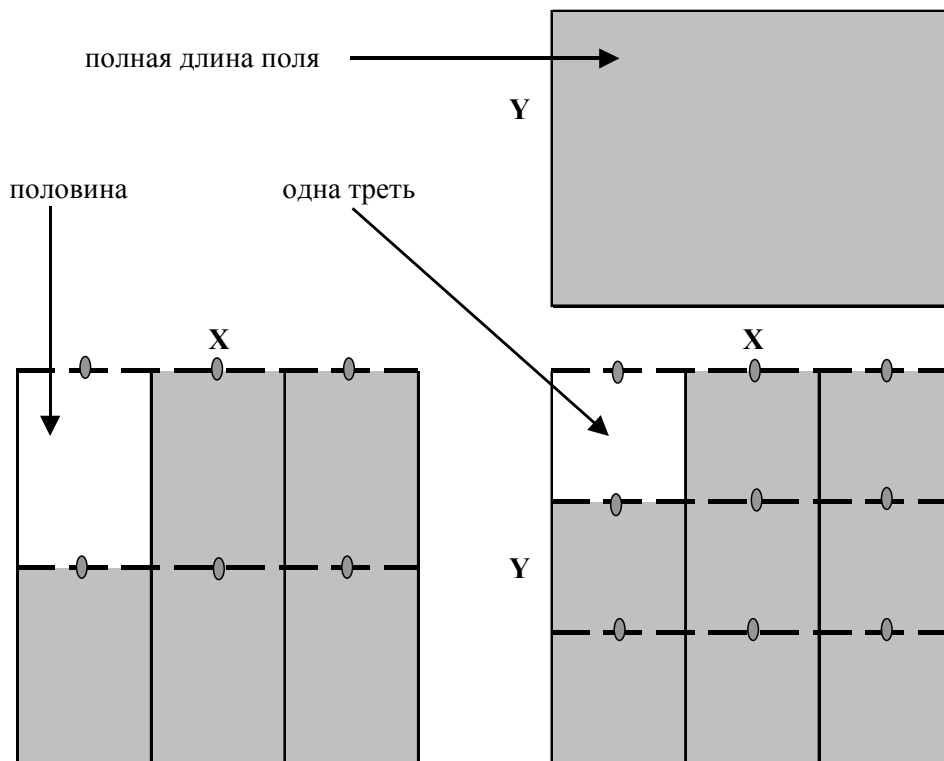


Рис.8. Схема подбора длины поля, включая многоярусный полив

- 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 водоподдачи: непрерывный или дискретный; управляемый автоматически или вручную
- Схема поливов сельхозкультур, в каждую борозду или через борозду.

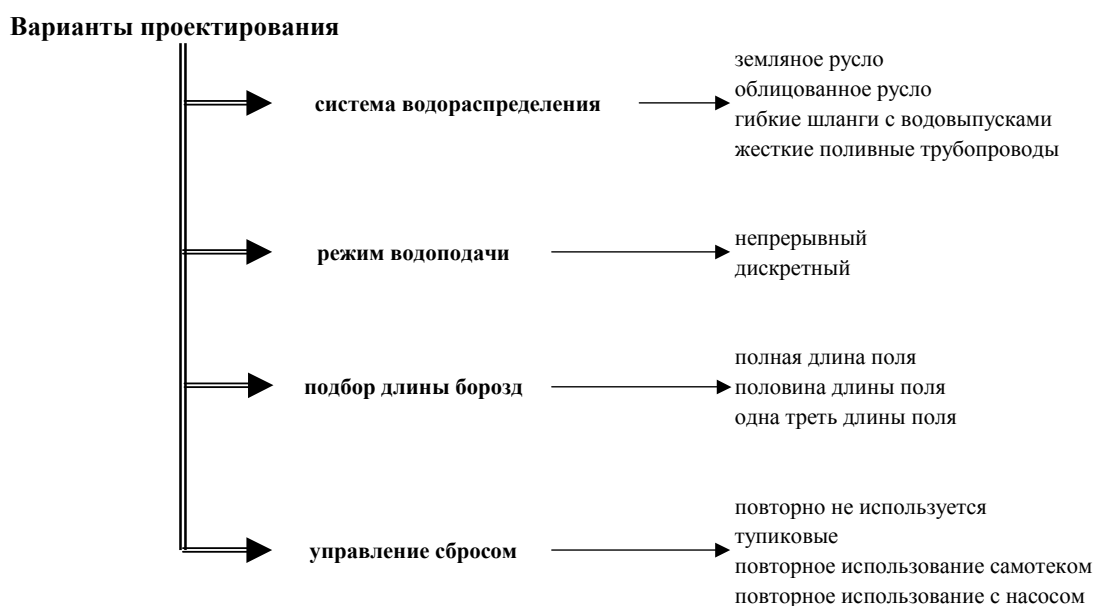


Рис.9. Варианты проектирования

К критериям, используемым при оценке проектных решений относятся следующие: суммарное использование воды ($\text{м}^3 \text{га}^{-1} \text{год}^{-1}$), 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 ($\text{кг/денежная единица}$), соотношение суммарные затраты–использование воды (денежная единица/ м^3), соотношение фиксированные (и переменные) затраты–использование воды (денежная единица/ м^3), глубинная инфильтрация/угроза засоления ($\text{м}^3 \text{га}^{-1} \text{год}^{-1}$), срезка почвы при планировке (см) и индекс эрозии почвы.

Анализ воздействия включает оценку урожайности сельхозкультур, 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.

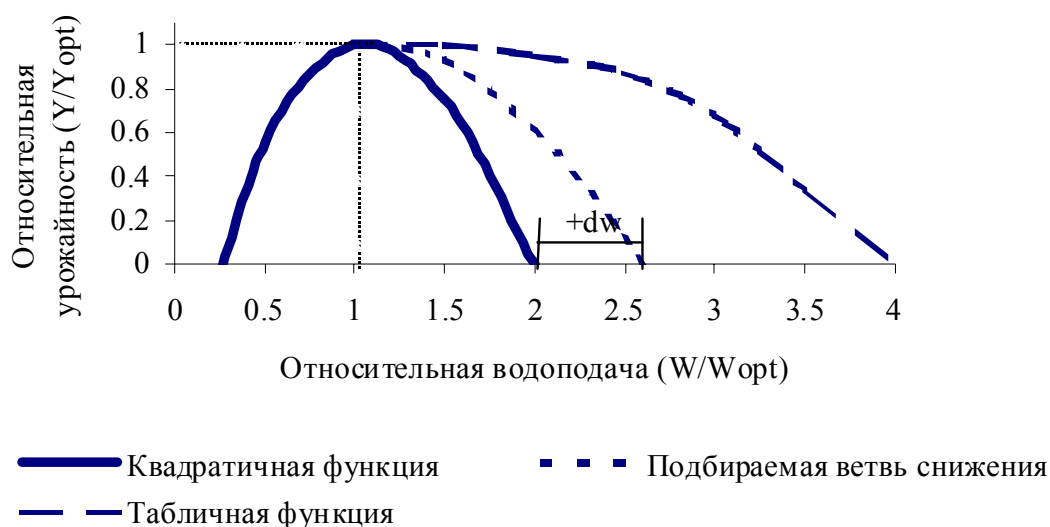


Рис. 10. Зависимость «вода–урожайность»

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., 2005а, б). 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

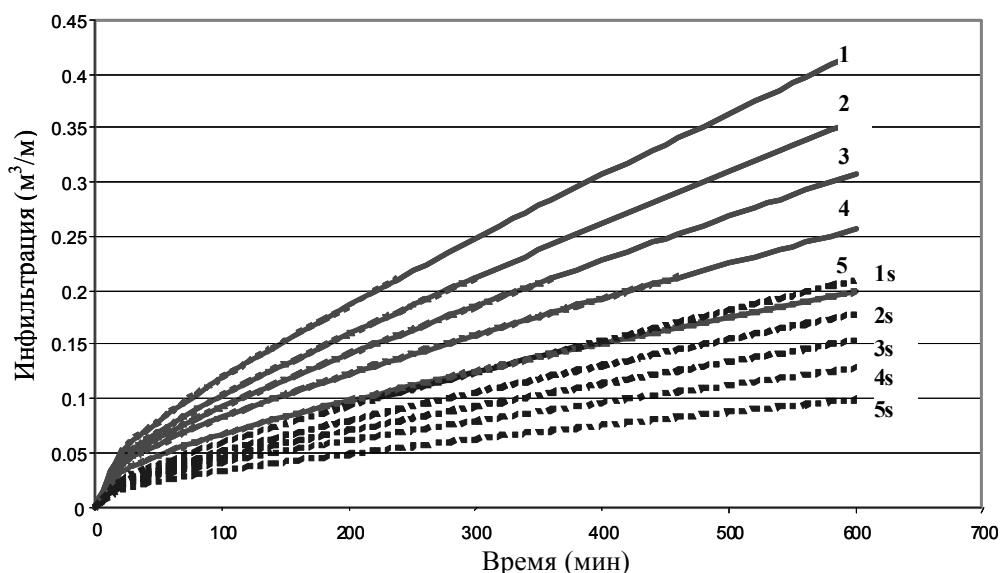


Рис.11. Кривые суммарной инфильтрации при непрерывном (-----) и дискретном (- - -) поливах

Наиболее представительные типы полей в Ферганской долине имеют характеристики, приведенные в таблице 3. Для использования были отобраны 9 типичных полей или “workspace”(«рабочих интервалов») (W_i , где

I = 1, 2, ..., 9) с комбинированием размеров полей и классов водопроницаемости (таблица 4).

Таблица 3. Наиболее представительные типы полей

Размеры полей	Площадь	Длина	TAW*	Ширина	Продольный уклон
	(га)	(м)	(мм/м)	(м)	(%)
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 x 200 м с длиной 300 м
- 10 га- 400 x 250 м с длиной 400 м
- 20 га- 400 x 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 (переполлив)	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)	a
	Через борозду (1,80 м)	b
4. График поливов	Переполив (нынешний)	a
	Улучшенный (MAD=0,4)	b
	Оптимальный (MAD=0,6)	c
	Дефицитный (MAD=0,8)	d
5. Режим водоподачи	Непрерывный	a
	Дискретный	b
6. Распределение воды на поле	земляное русло	a
	гибкий шланг	b
	жесткий трубопровод	c
7. Подбор длины борозд	полная длина поля	a
	половина длины поля	b
	1/3 длины поля	c
8. Управление концевым сбросом	сквозные борозды	a
	тупиковые борозды	b
	при помощи насоса	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 п.с. 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 выгоды (полезности) альтернатив, зависящая 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 (W_i) и альтернативного проекта (P_i)

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 нынешней ситуации P0 водопотребление выше в сравнении с улучшенными сценариями, включая простую подгонку длительности водоподачи в сценарии P1 (рис. 12).

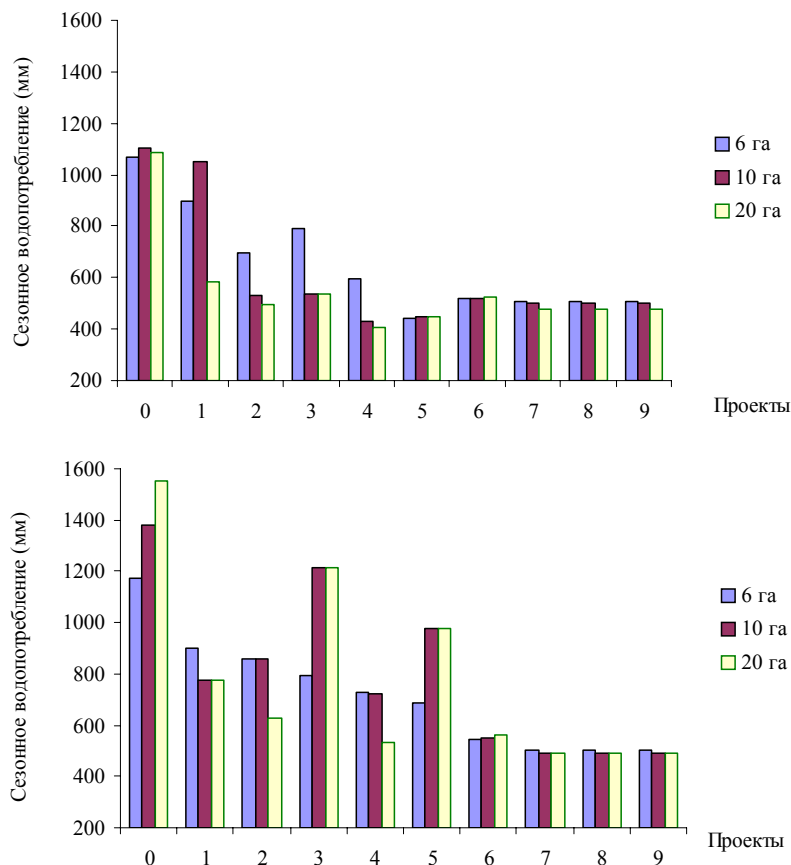


Рис.12. Зависимость сезонного водопотребления от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

При рассмотрении варианта подбора длины борозд (рис. 12а), 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).

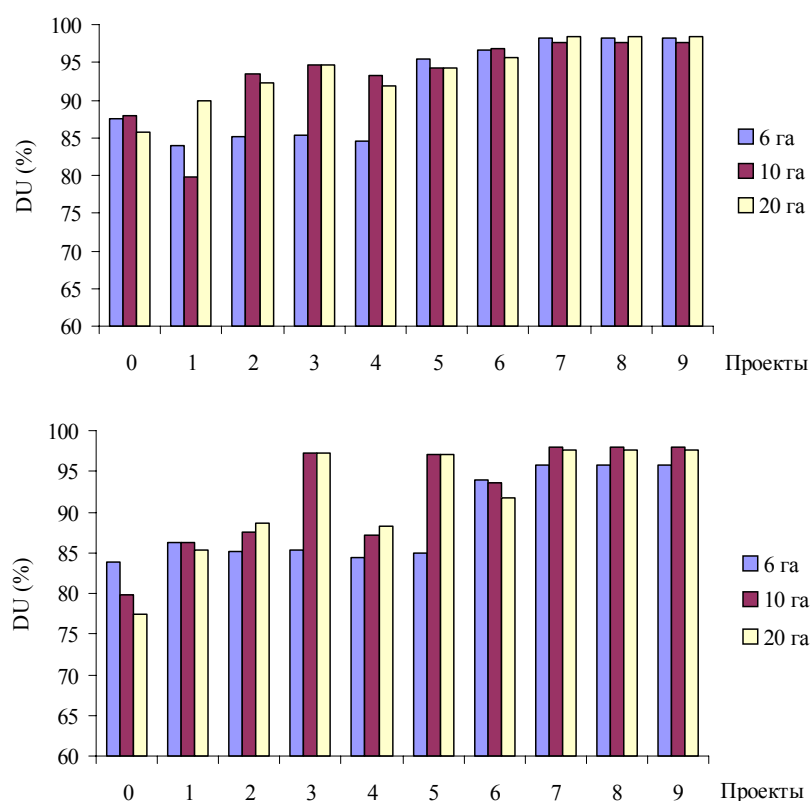


Рис.13. Зависимость равномерности увлажнения от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

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 (E_a) (рис. 14) менее хороши, чем значения DU, но

примечательно, что лишь только за счет удачного подбора длительности полива E_a существенно возрастает относительно нынешнего сценария для всех сценариев, включая P1. При сравнении непрерывного и дискретного полива для полей с подбором длины результаты аналогичны; однако, лучшие результаты показывают непрерывный полив в каждую борозду (P2 и P3) и дискретный полив в каждую борозду (P6).

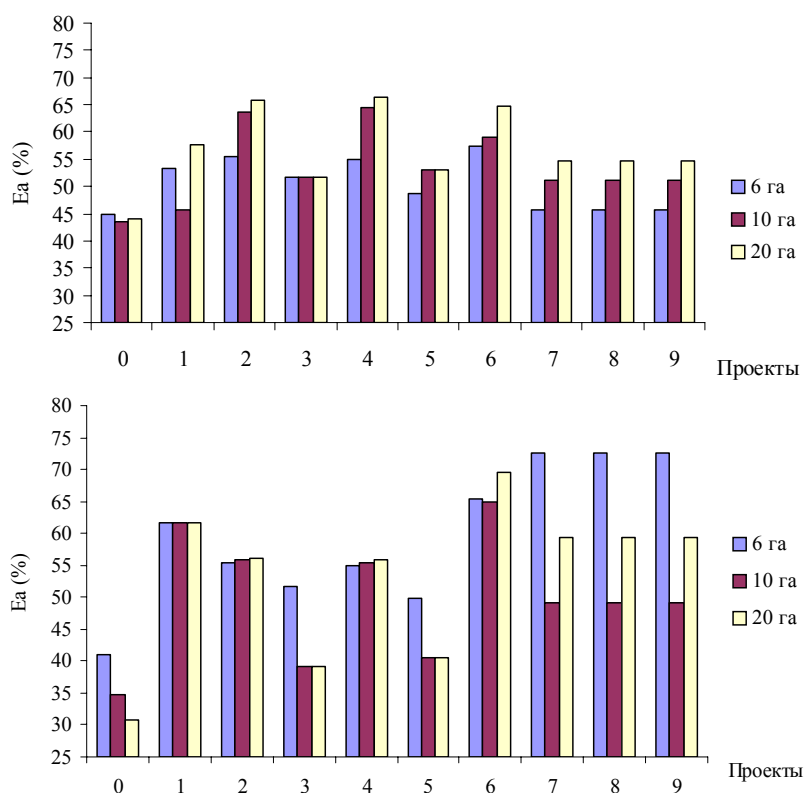


Рис.14. Зависимость эффективности использования поливной нормы от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

Очевидно, что когда сохраняется фактическая длина, дискретный полив представляет самые высокие значения E_a . В этом случае поля меньших размеров (6 га) показывают лучшие результаты, в противовес вариантам с подбором длины. P1 (непрерывный полив) показывает результаты, аналогичные дискретному поливу.

Глубинная фильтрация и риск засоления

Нынешний сценарий (P0), 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.

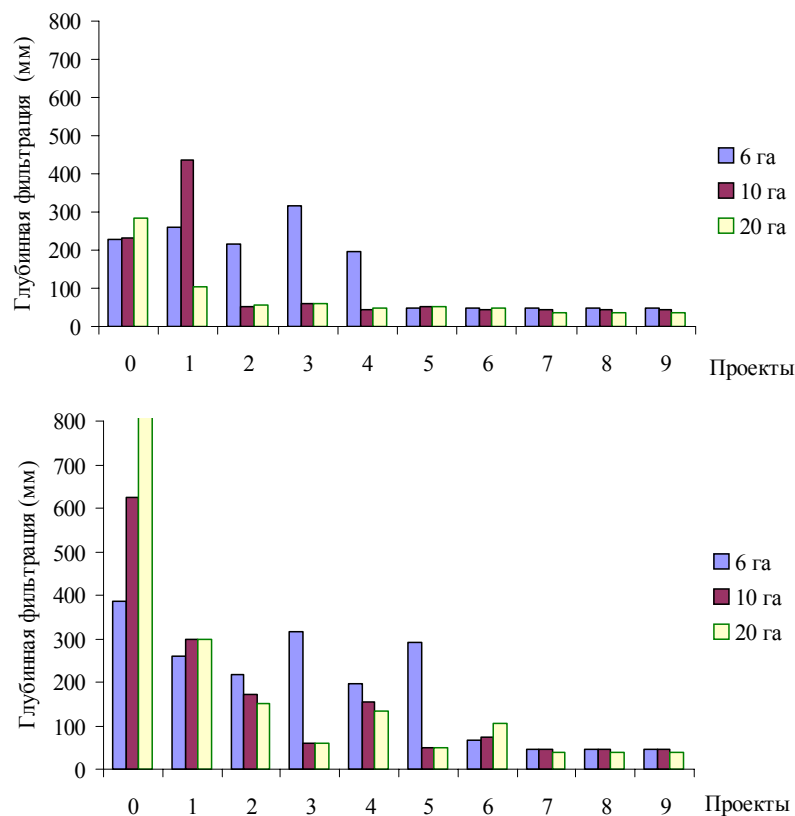


Рис.15. Зависимость суммарной глубинной фильтрации (риск засоления) от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а,верху) или с сохранением фактической (b,внизу)

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.

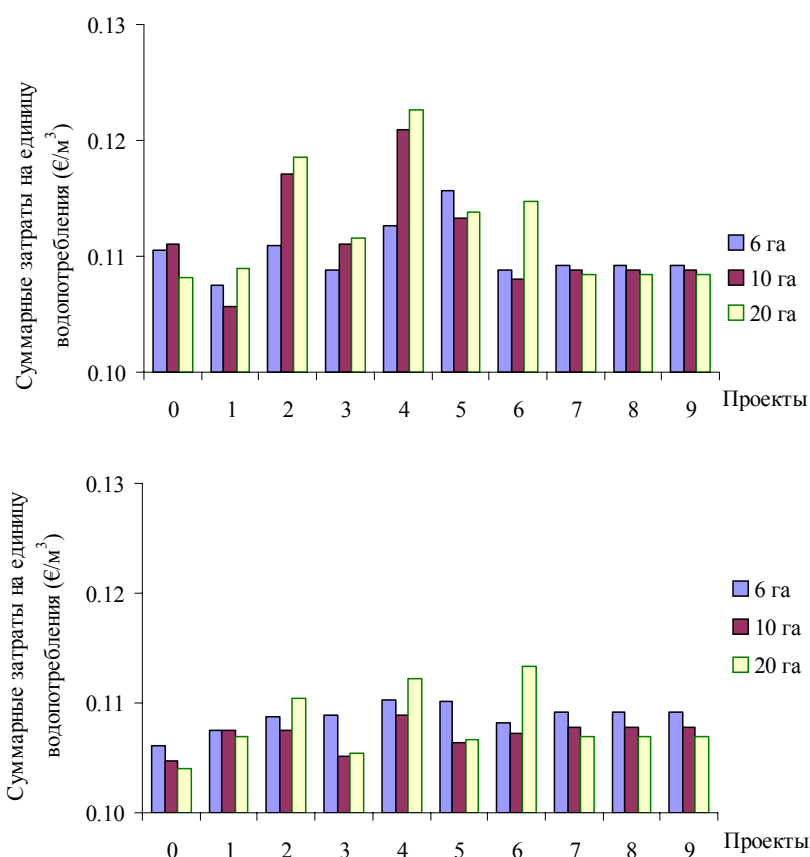


Рис.16. Зависимость суммарных затрат на единицу использованной воды от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

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).

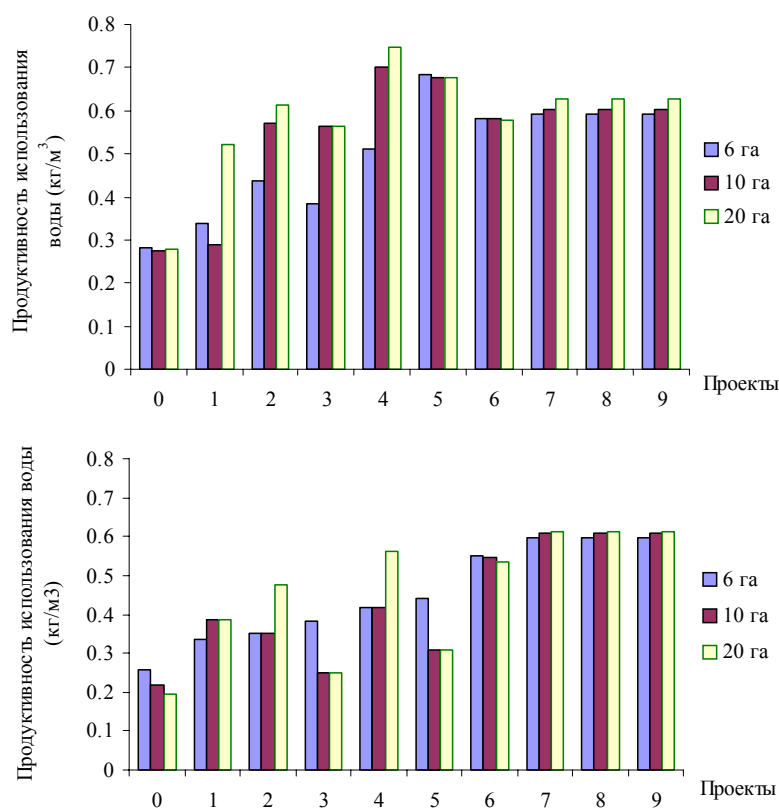


Рис.17. Зависимость продуктивности использования воды от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

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.

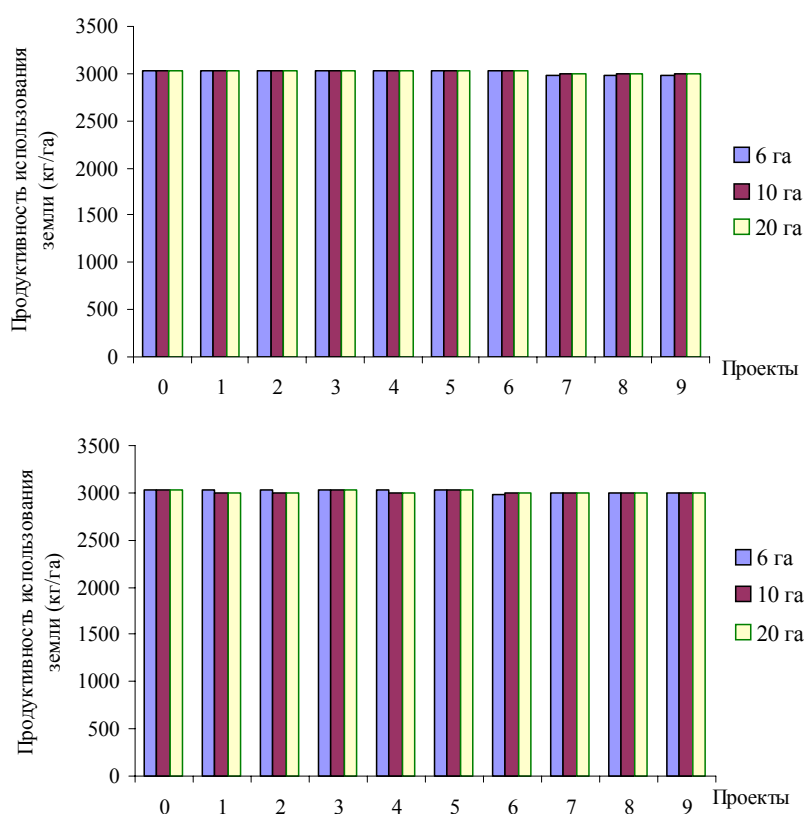


Рис.18. Зависимость продуктивности использования земли от прогрессивных усовершенствований и размеров полей, с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

Характеристики полива в зависимости от характеристик инфильтрации

При анализе характеристик полива, зависящих 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 внутривладельческом уровне приоритеты относятся к балансу между экономическими и экологическими воздействиями.

Сезонное водопотребление

Самое высокое водопотребление 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.

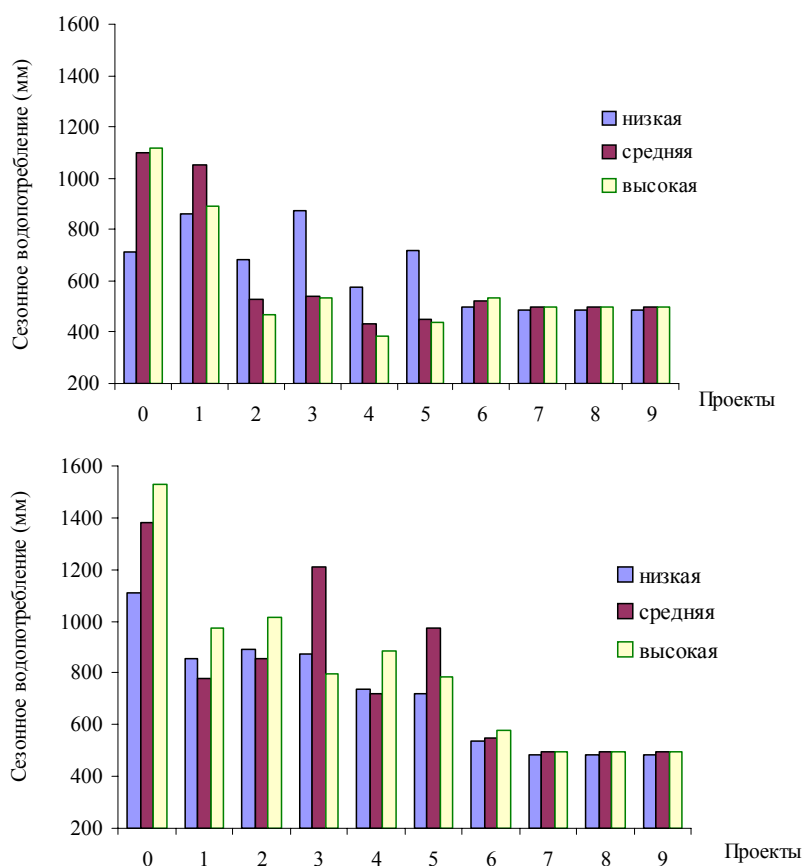


Рис.19. Зависимость сезонного водопотребления от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

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).

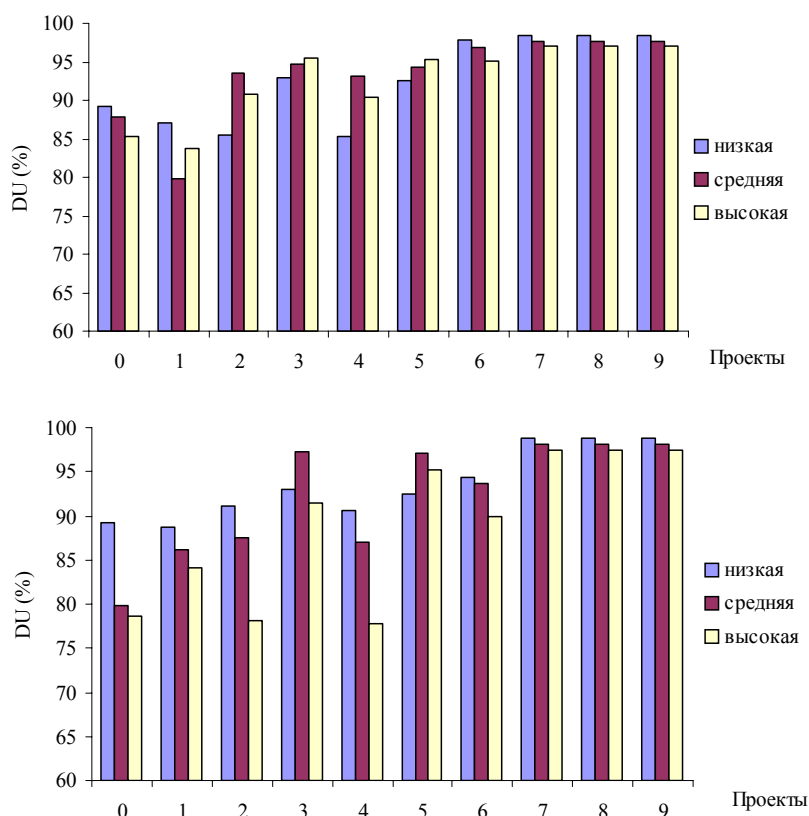


Рис. 20. Зависимость равномерности увлажнения от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

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 водопроницаемости 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 E_a 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 E_a 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.

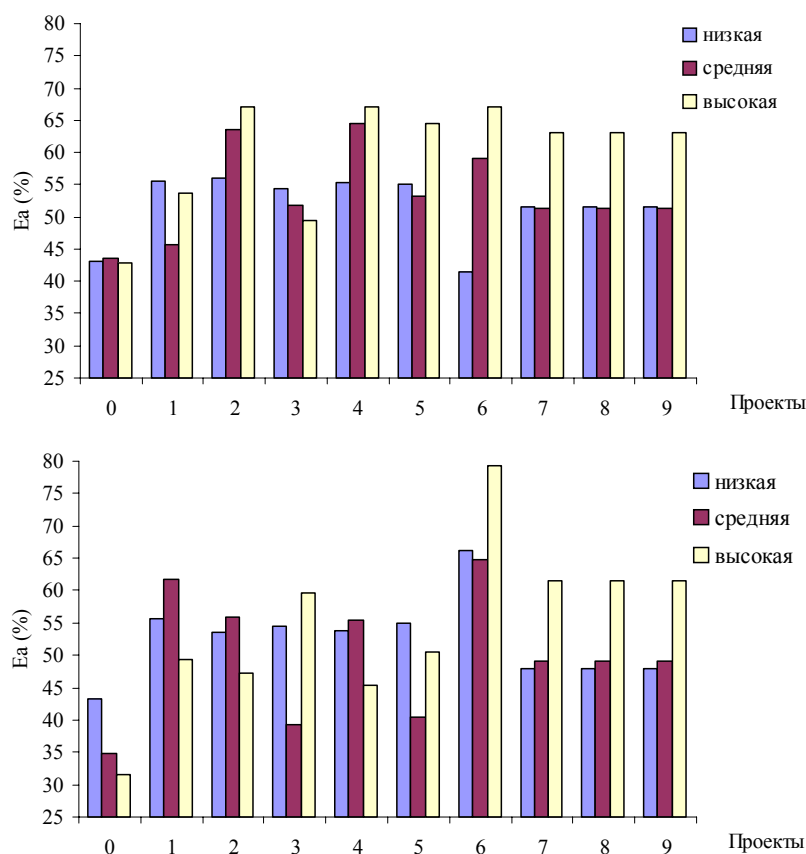


Рис.21. Зависимость эффективности использования поливной нормы от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

Сценарий дискретного полива при сохранении существующей длины борозд, представляет самые высокие значения E_a , 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. 22а). 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 (P3 и P5). Тем не менее, наилучшие результаты достигнуты при дискретном поливе, как с подбором длины борозд, так и без него (рис. 22).

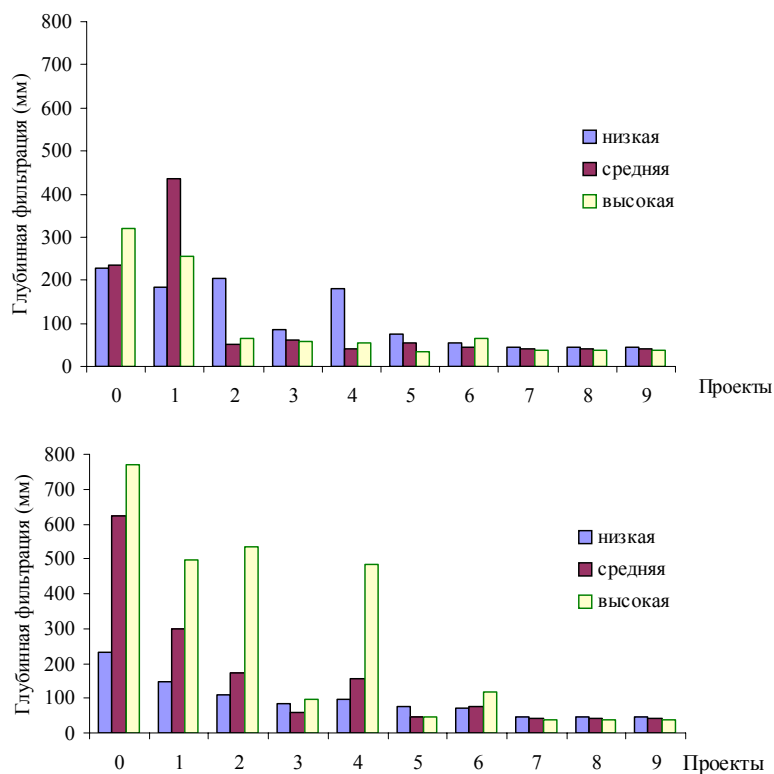


Рис.22. Зависимость глубинной фильтрации (риск засоления) от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а, сверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

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 P4 и P5 (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.

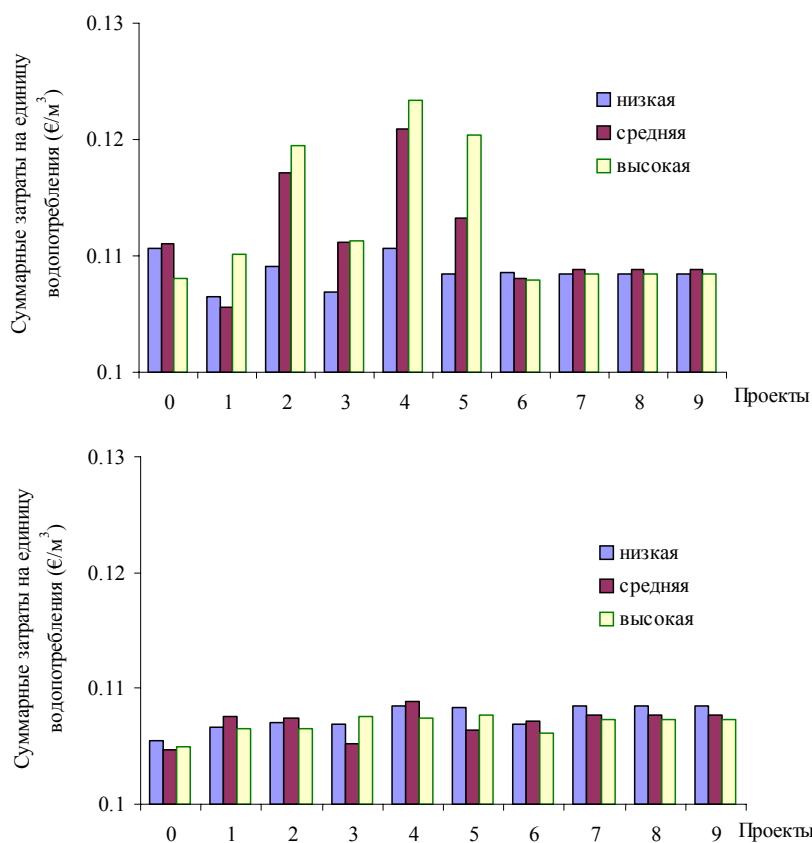


Рис.23. Зависимость суммарных затрат на использование воды от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (б, внизу)

Продуктивность использования воды

Нынешний WP, как отмечалось ранее, очень низкий, но существенно возрастает, если осуществляются улучшенные сценарии.

В варианте подбора длины лучшие 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.

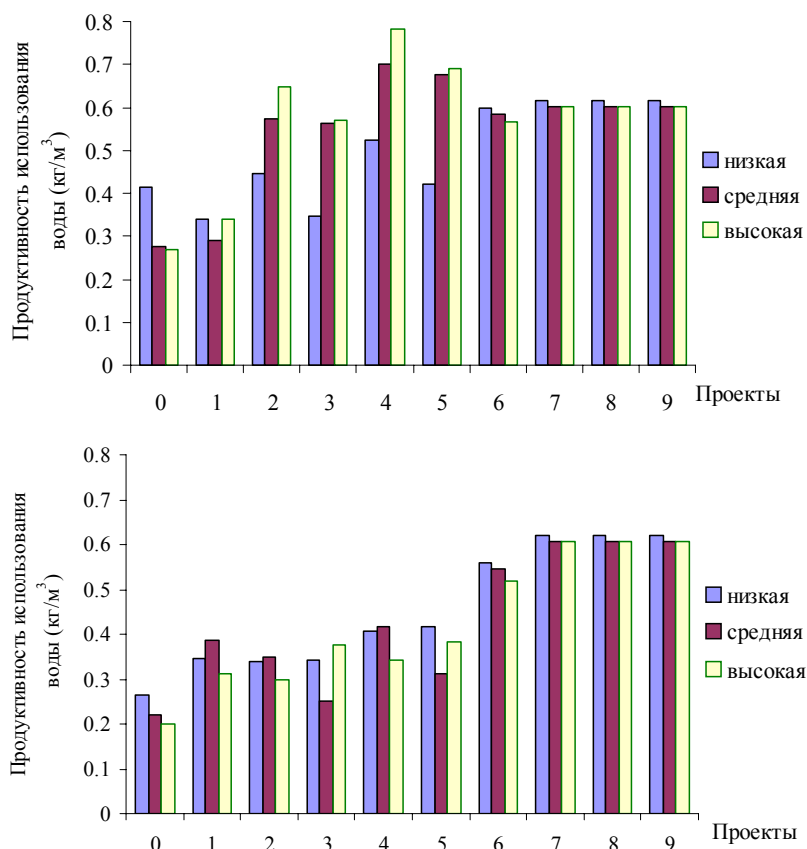


Рис.24. Зависимость продуктивности использования воды от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а,верху) или с сохранением фактической (b,внизу)

Наивысший показатель WP независимо от водопроницаемости при дискретном поливе в варианте с существующей длиной борозд, с увеличением до $0,6 \text{ кг/м}^3$ относительно $0,3-0,4 \text{ кг/м}^3$ 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.

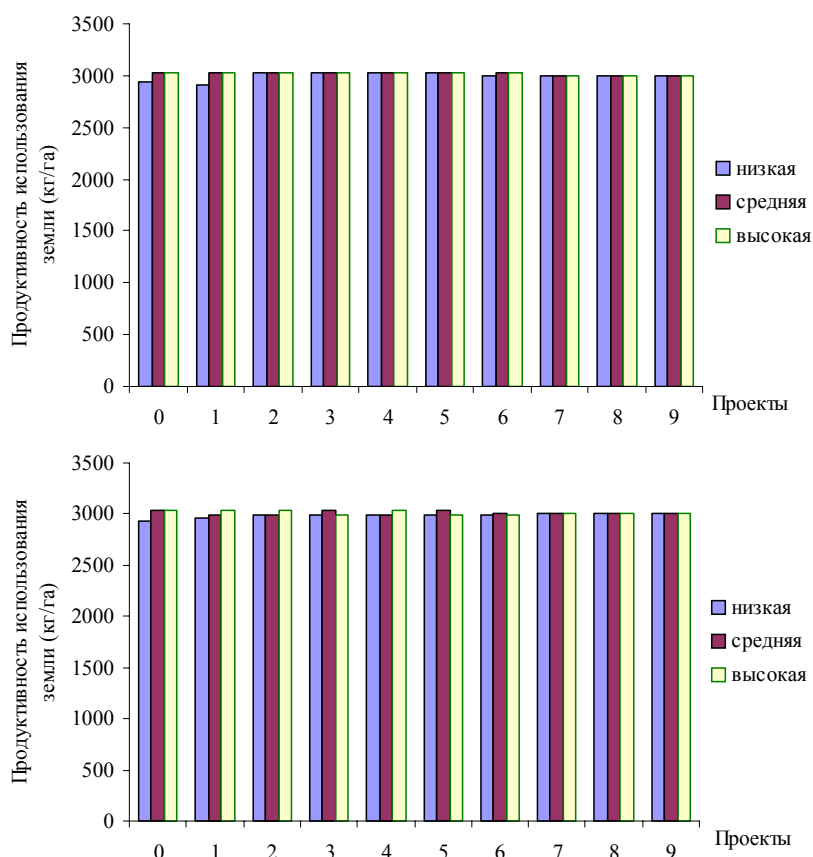


Рис.25. Зависимость продуктивности использования земли от прогрессивных усовершенствований и с влиянием водопроницаемости почв, с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

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.

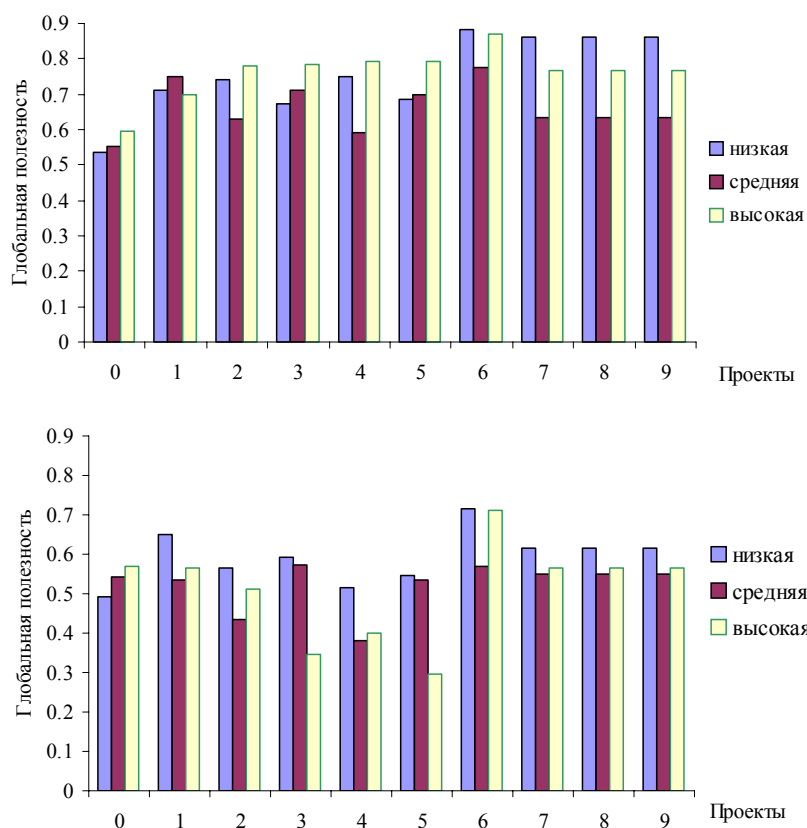


Рис.26. Зависимость глобальной полезности от степени совершенства сценариев и водопроницаемости почв для полей площадью 10 га (W2), с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

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.

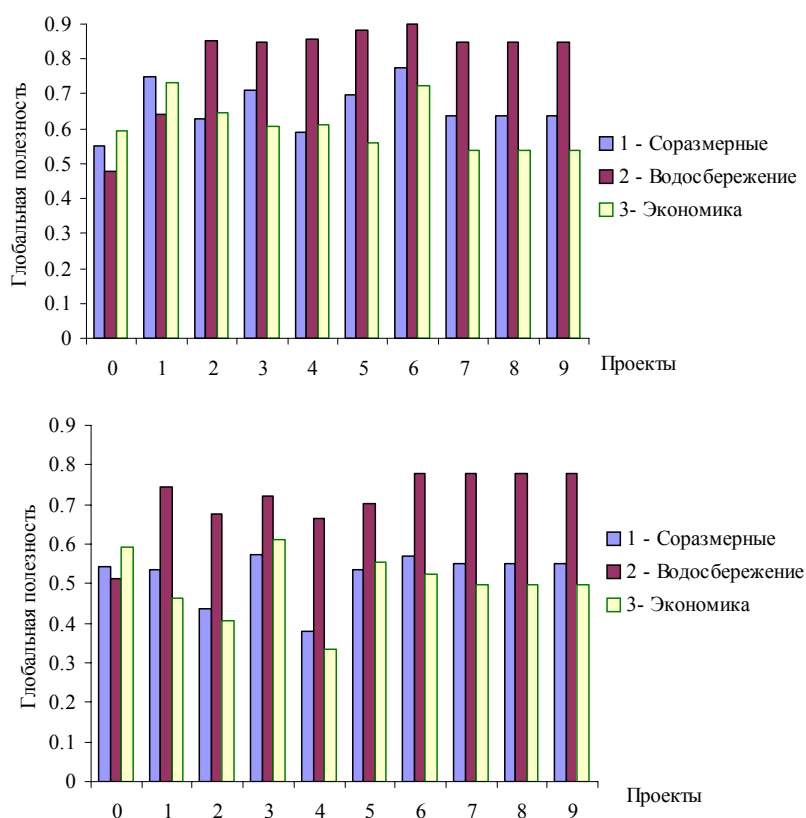


Рис. 27. Зависимость глобальной полезности проектов от критериев приоритетности, с подбором длины борозд (а, вверху) или с сохранением фактической (b, внизу)

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 большой 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 хлопчатника и озимой пшеницы в Центральной Азии (в этой книге)
- Gonçaves 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.
- Gonçaves 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., Gonçaves 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. Гонсалвес³², А. Муга³², П. Матеус³², А.А. Кампос³²

Реферат: Модель SEDAM (**sector demand and distribution model** – 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 внутривладельческих 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 сельскохозяйственных культур и доходов фермеров. Модель создает сценарии, основанные на действиях по управлению системой, взаимосвязанных с системой водоподдачи 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 водоподдачи с шагом 10 суток и показатели характеристик полей и сектора.

SEDAM объединяет несколько моделей и баз данных (рис. 1). Для формирования графиков полива сельскохозяйственных культур 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.

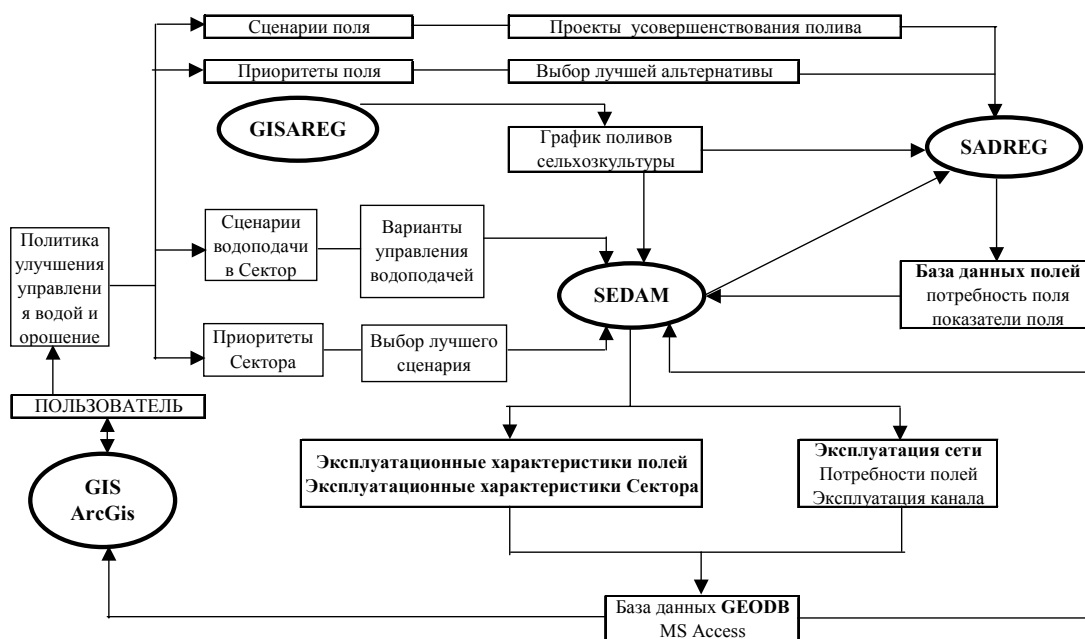


Рис. 1. Интеграция моделей SEDAM и базы данных

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.

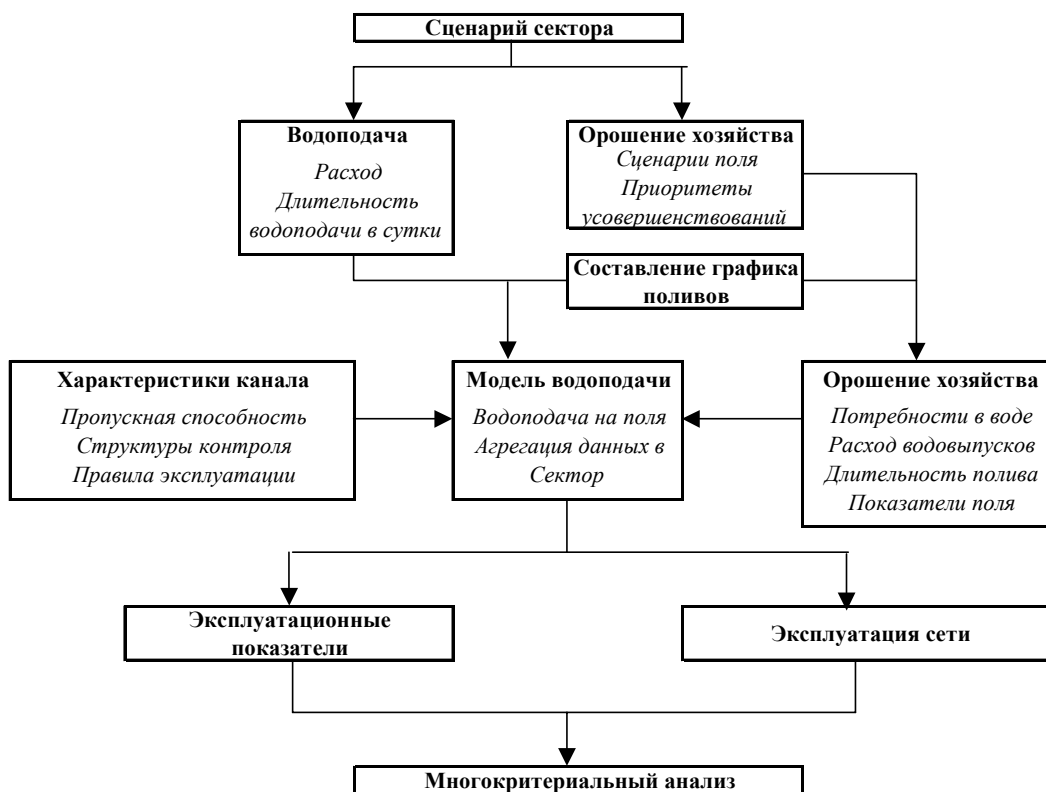


Рис. 2. Блок-схема SEDAM от принятия сценария до многокритериального анализа

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 добегаания 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 образует 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	<ul style="list-style-type: none"> ▪ минимизировать издержки ▪ максимизировать урожай ▪ максимизировать доходы ▪ минимизировать засоление почв ▪ максимизировать водосбережение 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ минимизировать издержки ▪ максимизировать урожай и доходы ▪ минимизировать воздействие на дренажную систему ▪ максимизировать социальные доходы (т.е. занятость, доходы фермеров)
Переменные решений	<ul style="list-style-type: none"> ▪ расходы водоподачи на поле ▪ способ полива ▪ график поливов ▪ земельные условия (планировка земель, уклон, длина) ▪ повторное использование сброса 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ расход водоподачи в голове сектора ▪ дата водоподачи ▪ график водоподачи
Ограничения	<ul style="list-style-type: none"> ▪ затраты на воду ▪ возделываемая площадь ▪ земельные налоги ▪ агрономические приемы 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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: (А) предпочтения, относящиеся к уровню хозяйства при выборе схем орошения полей; (В) сценарии для поля, связанные с усовершенствованием орошения хозяйства; (С) альтернативные головные расходы водоподачи в сектор; и (D) альтернативные суточные длительности водоподачи.

Факторы С 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 А и В в сочетании с С и D.

Факторы усовершенствования относятся к следующим уровням:

- Фактор А – А1, когда приоритет отдается экономическим проблемам; А2, если приоритет устанавливается для воздействий на окружающую среду и водосбережение, и А3, если приоритеты сбалансированы
- Фактор В – существует 9 уровней, как показано в таблице 2 со ссылкой на полевые проекты SADREG (Gonçalves *et al.*, 2005)
- Фактор С – 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):

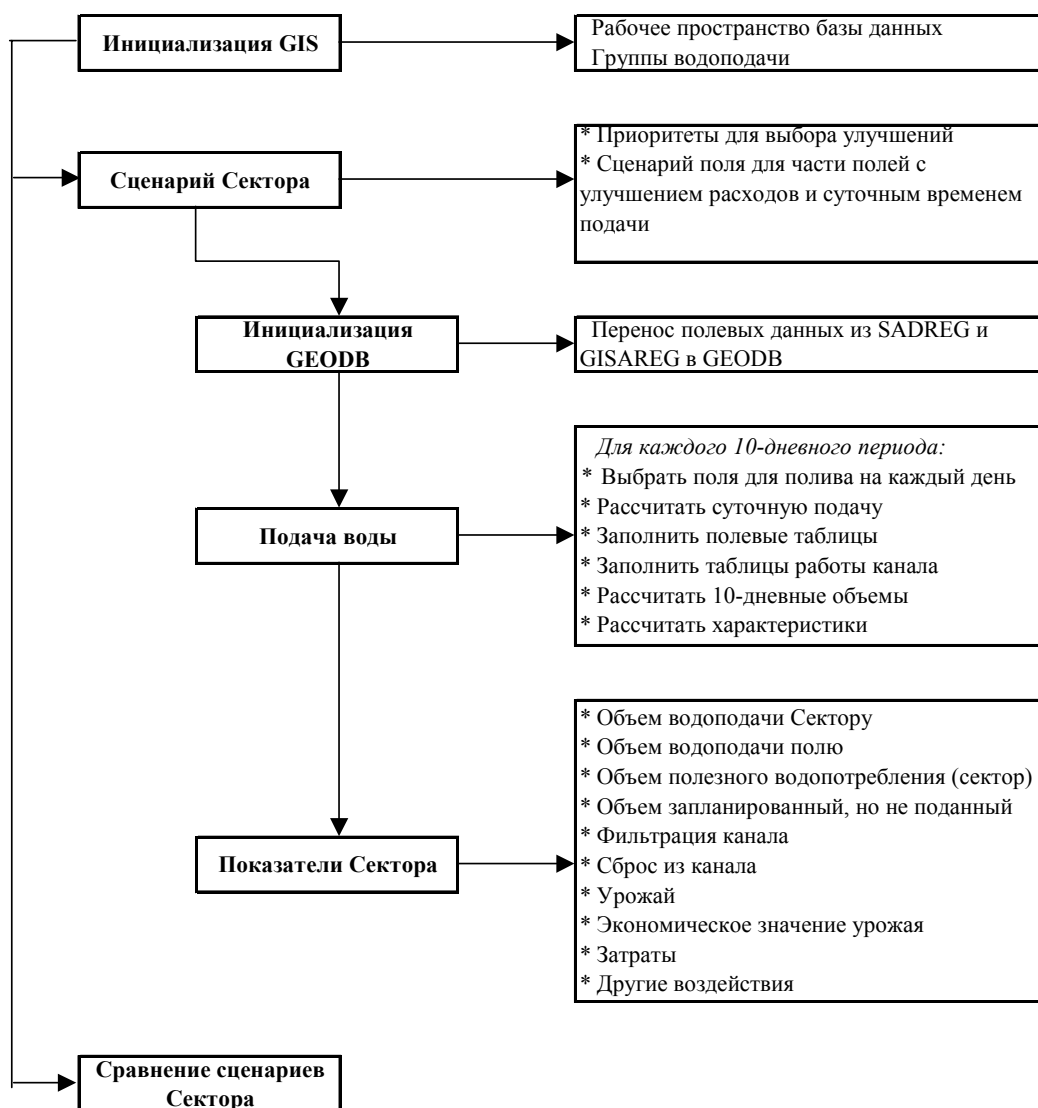


Рис. 3. Последовательность действий от инициализации модели до сравнения сценариев

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).

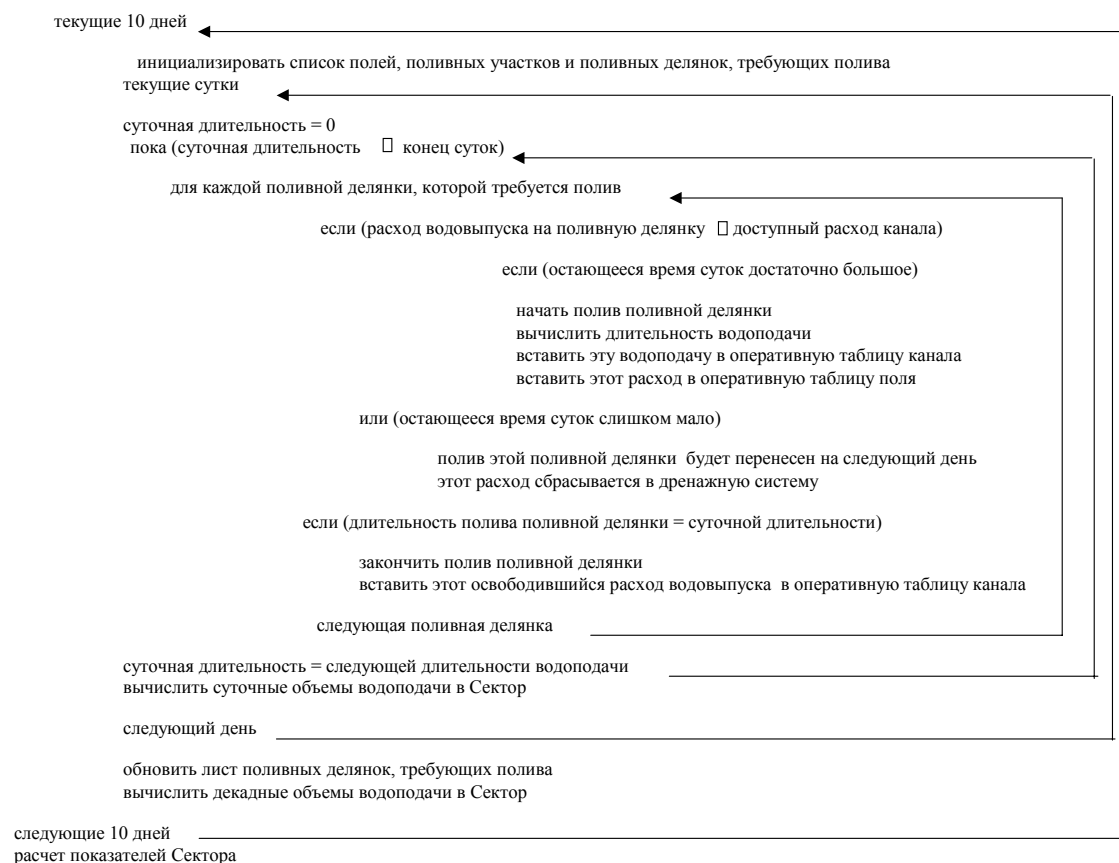


Рис.4. Блок-схема расчетов водоподачи в течение каждого 10-дневного периода

Модель водоподачи из канала использует следующие правила водоподачи и процедуры:

а) Схема водооборота рассматривается в соответствии со структурой посевов и основывается на, предварительно подготовленной пользователем, последовательности группы полей;

б) Предполагается, что водоподача для каждого поля при ограничении доступного расхода из канала-распределителя осуществляется всеми соответствующими водовыпусками;

с) 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;

д) Полив поля начинается, когда имеющееся в распоряжении время суток соответствует времени необходимому для полива; в противном случае полив будет перенесен на следующий день;

е) Если вода не подается на поле для орошения в течение текущего 10-дневного периода, оно будет поливаться в начале следующих 10 дней;

ф) Когда на поле заканчивается полив, высвобождаемая вода перераспределяется на следующее поле соответственно последовательности графика

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;

$$t_{\text{lag}} = L_{\text{reach}} / V_{\text{av}} \quad [1]$$

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);

г) Фильтрация из канала оценивается как доля объема потока воды, пропорциональная расходу и протяженности участка канала:

$$Q_{\text{seepage}} = Q_{\text{in}} \times f_{\text{seepage}} \times L_{\text{reach}} \quad [2]$$

где Q_{seepage} (м³/с) – фильтрация, L_{reach} (м) – длина участка канала; Q_{in} (м³/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:

- а) Данные о распределении полей, в том числе начало и конец полива;
- б) Данные, характеризующие управление оросительной сетью и относящиеся к расходу водорегулирующих сооружений в течение оросительного периода;
- в) Объемы воды, включая эффективную водоподачу, фильтрацию и сброс;
- г) 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

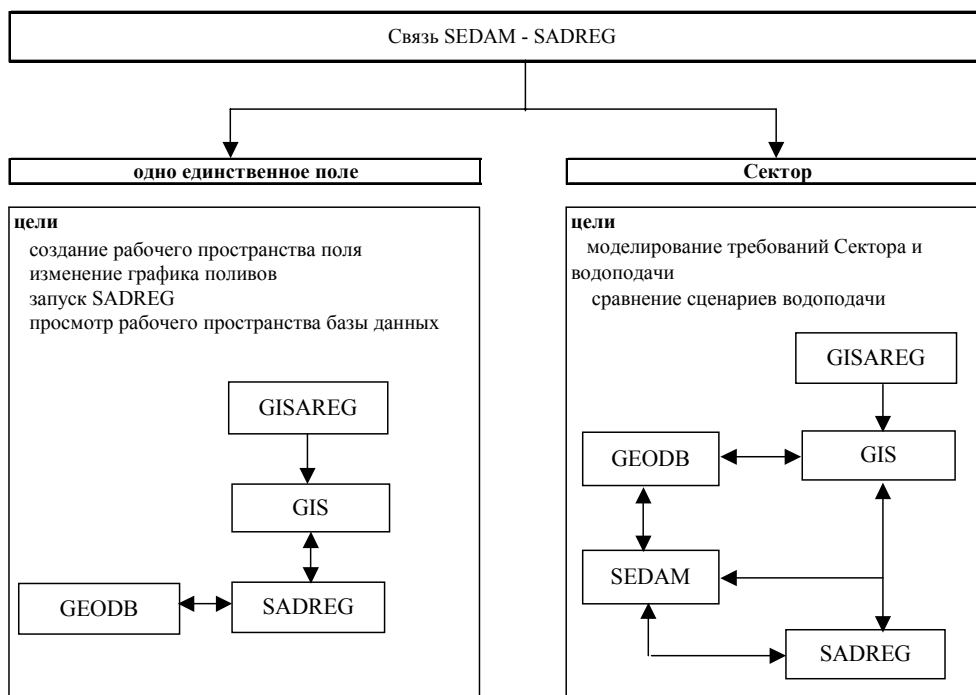


Рис.5. Применение моделей SADREG во взаимодействии с базой данных GIS GEODB

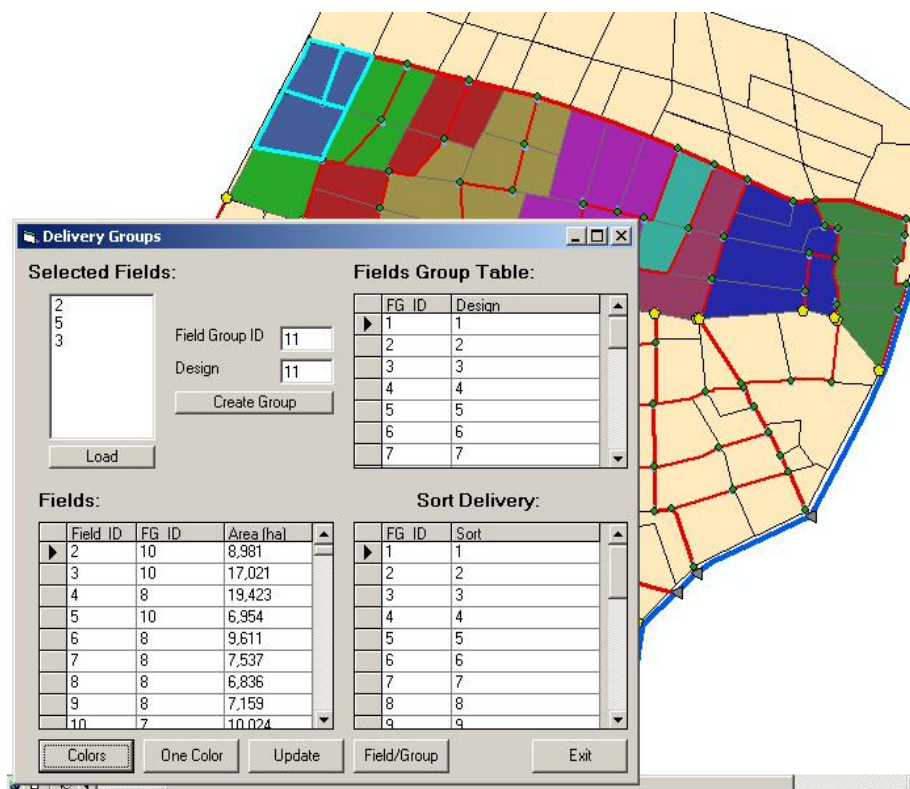


Рис.6. Способ определения групп водоподачи вдоль канала, при котором пользователь выбирает поля по карте, а таблица создается автоматически и на карте цветом выделяются результаты

- 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.

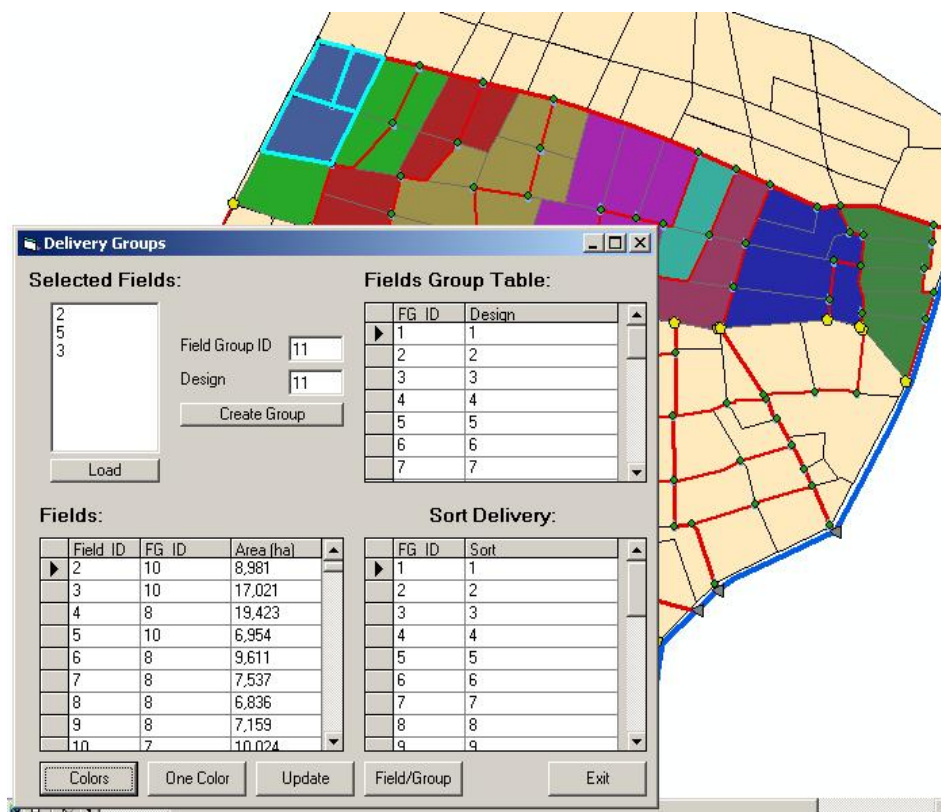


Рис. 7. Связь рабочего пространства с картой полей

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

$$U_i = \alpha_{Mi} \cdot (X_i - X_{i,\min}) \quad [3]$$

- Затраты

$$U_j = 1 - \alpha_{Mj} \cdot (X_j - X_{j,\min}) \quad [4]$$

- Экологические проблемы

$$U_k = 1 - \alpha_{Mk} \cdot (X_k - X_{k.min}) \quad [5]$$

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} (а)	X_{max} (а)	α_M (а)
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

(а) Эти значения вычисляются автоматически и обусловлены набором фактических данных.

Принимая определяемые пользователем веса (λ_j) для каждого критерия j , глобальная полезность рассчитывается, как:

$$U = \sum_{j=1}^7 \lambda_j \cdot U_j \quad [6]$$

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).

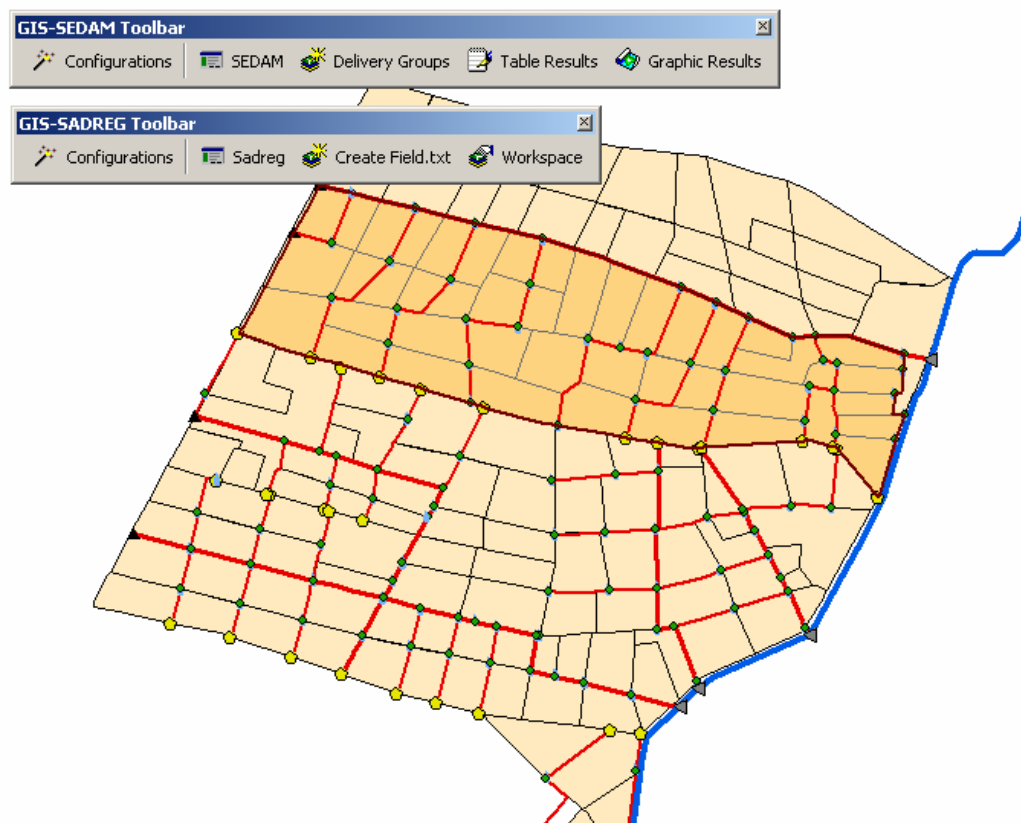


Рис. 8. Карта сектора орошаемого района в Ферганской долине и клавиши связи функциональности GIS и обеих моделей SEDAM и SADREG

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 $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ (соответствует гидромодулю - $3,2 \text{ л}/(\text{с га})$).

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 В1

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	A2	
	Приоритет – экономика	Приоритет – экология	
B0	Нынешний	✓ <input type="checkbox"/>	
B1	Нынешний с улучшенным графиком водоподачи		✓ <input type="checkbox"/>
B2	Частичные усовершенствования полива по бороздам		✓ <input type="checkbox"/>
B3	Вся площадь под усовершенствованным поливом по бороздам		✓ <input type="checkbox"/>
B4	Непрерывный и дискретный полив в каждую борозду		✓ <input type="checkbox"/>
B5	Непрерывный и дискретный полив через борозду		✓ <input type="checkbox"/>
B6	Непрерывный и дискретный полив; дефицитное орошение		✓ <input type="checkbox"/>
B7	Непрерывный и дискретный полив через борозду: дефицитное орошение		✓ <input type="checkbox"/>
B8	Дискретный полив через борозду; дефицитное орошение		✓ <input type="checkbox"/>

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.

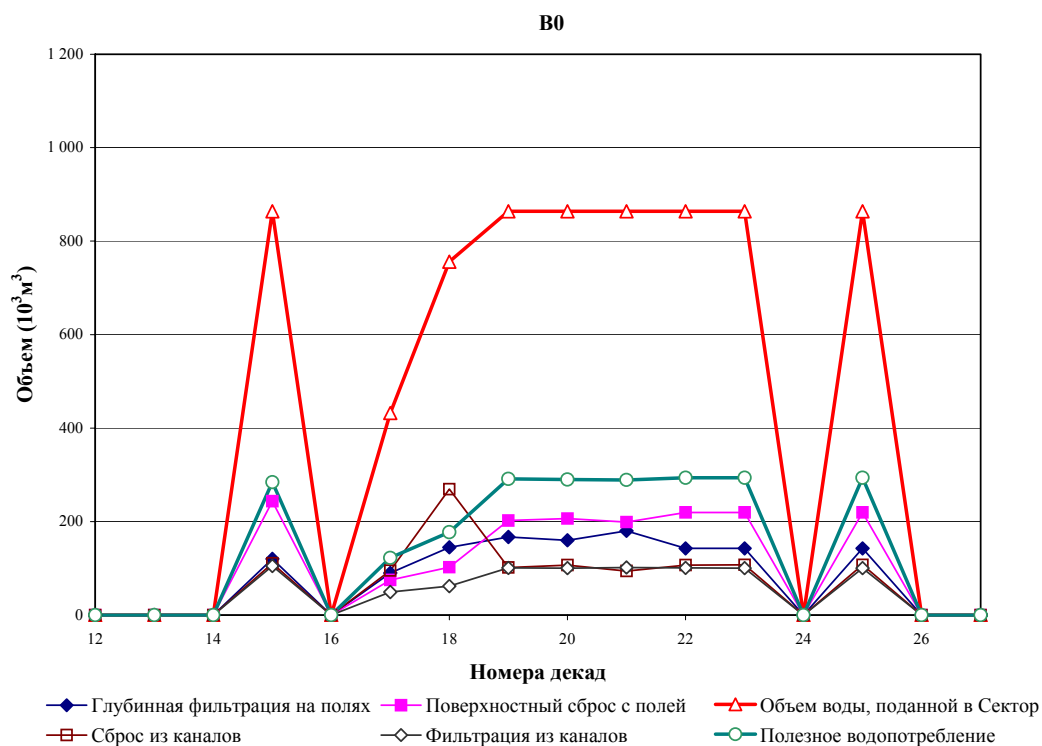


Рис.10. Сценарий В0, нынешний: объемы водоподачи за 10 дней и компоненты использования воды

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.

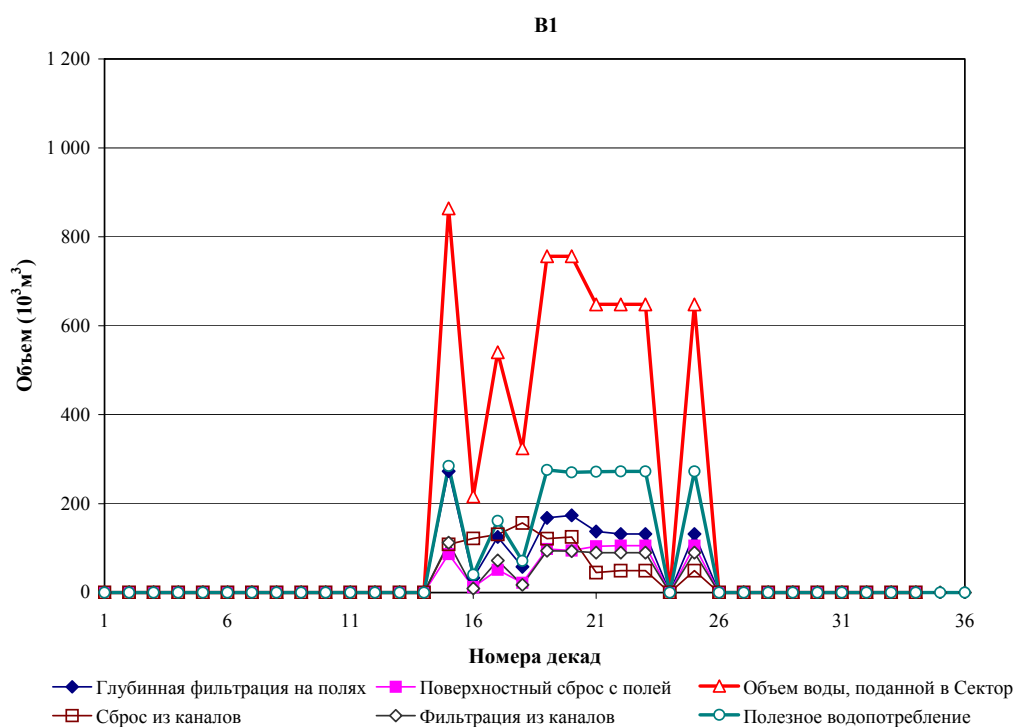


Рис. 11. Сценарий В1 с уточненной длительностью водоподачи: объемы водоподачи за 10 дней и компоненты использования воды

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 В2–В8 приводят к результатам, которые лишь немногим лучше, чем нереальный сценарий В1, подтверждающий важность точного учета условий водоподачи на поле в соответствии с поливной нормой. Сценарий В6 лидирует в повышении полезного водопотребления, что объясняется следующим: (а) выбор срока полива и поливной нормы соответствуют потребностям сельхозкультуры; (б) планировка поля благоприятствует ограничению глубинной фильтрации и поверхностного сброса; однако, поверхностный сброс не так хорошо управляется как в сценарии В1, т. к. в конце вегетационного периода инфильтрация почвы ниже, меньше воды впитывается и больше воды уходит за пределы поля; (с) 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).

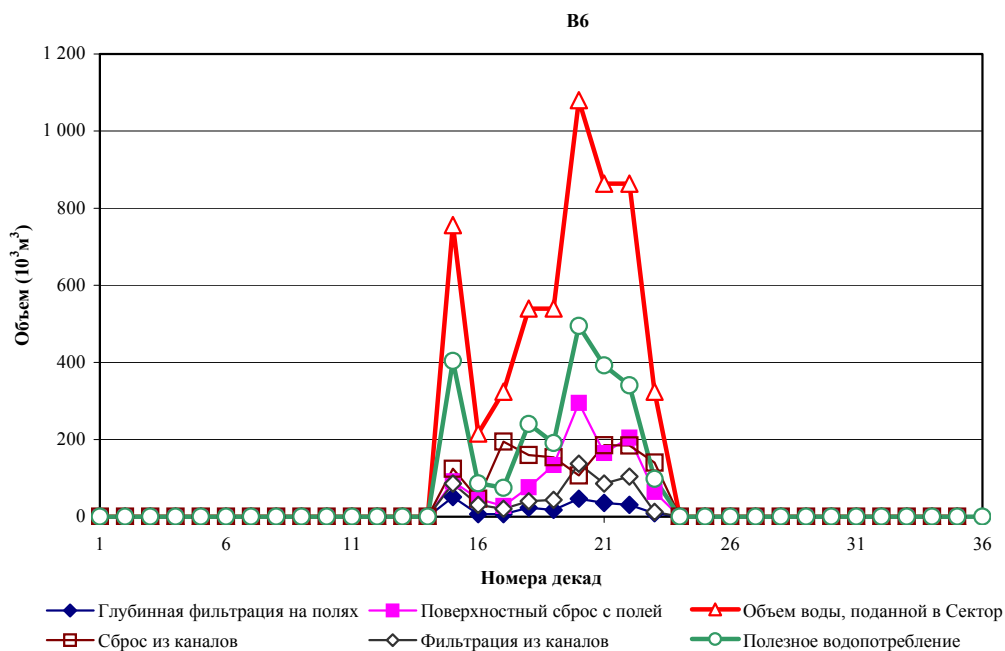


Рис.12. Объемы подачи воды сектору за 10 дней и использование воды для сценария В6

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 (В3–В8), 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.

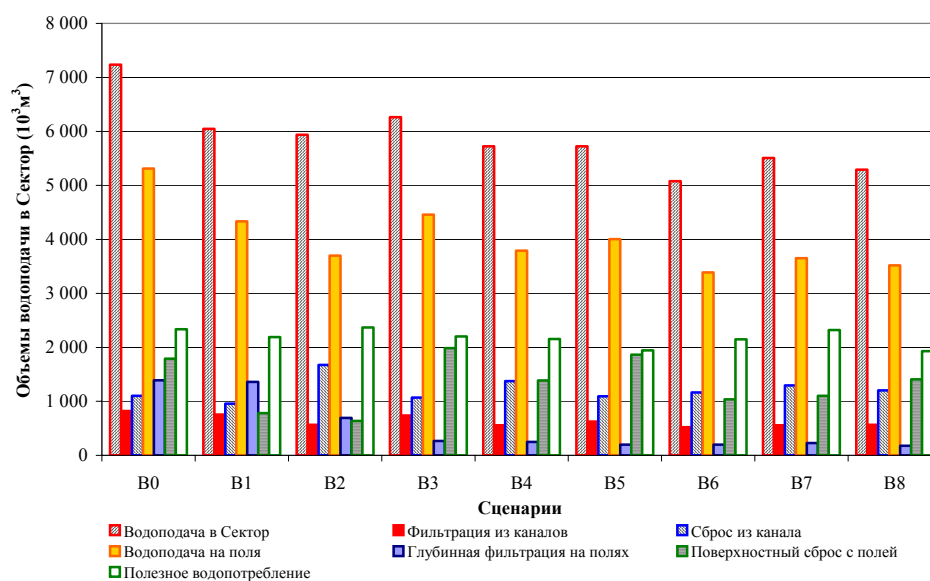


Рис. 13. Сезонное использование воды – общая водоподача, полезное и бесполезное водопотребление – для сценариев B0-B8

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.

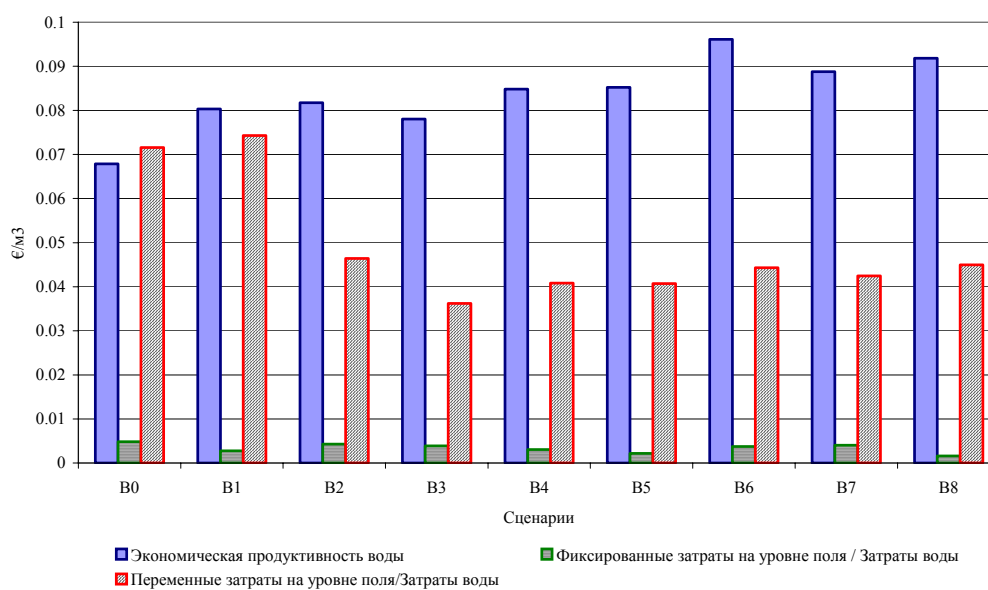


Рис. 14. Экономические показатели сценариев сектора

Сценарий В6 имеет высшую экономическую продуктивность использования воды, т.к. это сценарий, представляет ниже обычного объем водоподдачи 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.

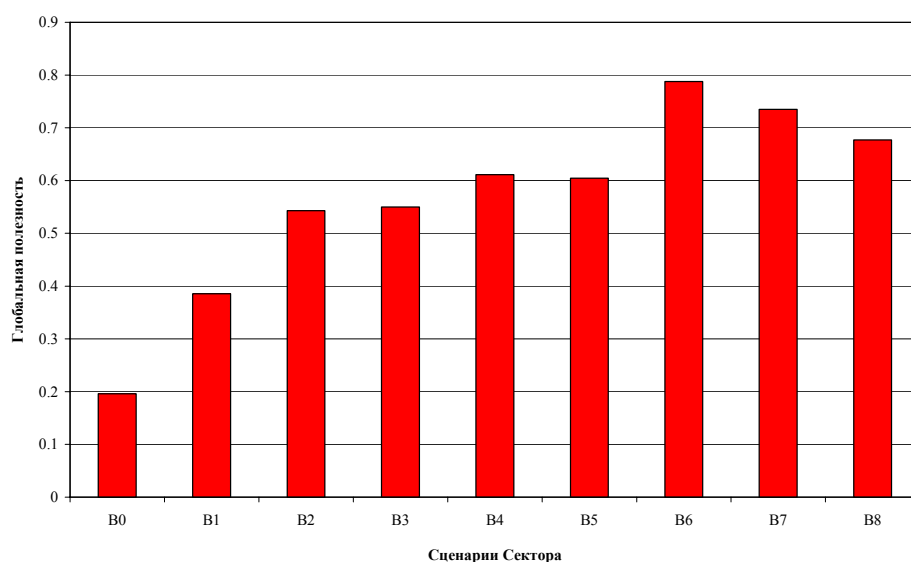


Рис.15. Глобальная полезность сценариев сектора

Заключение

Можно прийти 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 водоподдачи. Совмещение модели с GIS повышает ее возможности при оценке входных пространственных данных и поддерживает дружелюбный для пользователя интерфейс, как при работе модели, так и при просмотривании 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.