

УДК 631.671.1

АДАПТАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ К УСЛОВИЯМ ПРИАРАЛЬЯ

Г.В.Стулина^{*1}, Г.Ф.Солодкий², Ш.М.Кенжабаев¹

^{*1}International Fund for the Aral Sea saving, Interstate Coordination Water Commission,
Scientific - Information Center (SIC ICWC), Tashkent, Uzbekistan, E-mail: galina_stulina@mail.ru

²International Fund for the Aral Sea saving, Interstate Coordination Water Commission,
Scientific - Information Center (SIC ICWC), Tashkent, Uzbekistan, E-mail: solodky_g@mail.ru

В статье рассматриваются результаты расчёта режима орошения по программе REQWAT, модифицированной версией CROPWAT, дополненной учётом в водном балансе подпитки из грунтовых вод. Расчёт режима орошения проводится для откорректированных гидромодульных районов, на основе изменившихся природно-климатических условий.

Ключевые слова: Приаралье, ГИС, гидромодульное районирование, водопотребление, режим орошения, программа REQWAT.

Введение

Данная работа выполняется в соответствии с принятой Концепцией развития водного хозяйства Республики Узбекистан на период до 2030 года на основании Указов и Постановлений правительства Узбекистана.

Концепция предусматривает развитие водохозяйственного комплекса республики. Основной целью Концепции является определение основных путей решения проблем управления и использования водных ресурсов, дальнейшее развитие водохозяйственного комплекса, совершенствование системы управления водным хозяйством и мониторинга воды. Концепции в основном затрагивает вопросы управления и использования поверхностных водных ресурсов, развитие ирригационной и мелиоративной инфраструктуры, водосбережения в орошаемом земледелии. Одним из путей решения данной проблемы является реализация современной системы моделирования управления водными ресурсами.

Методы исследований

В основе расчетов обоснованного водопотребления принята программа CROPWAT - инструмент поддержки принятия решений, разработанный ФАО [Smith M. FAO, № 46, 1992]. Одним из недостатков программы CROPWAT является то, что она не предназначена для пакетной обработки расчета потребности в воде для сельскохозяйственных культур.

Возникла необходимость в пакетной версии модели потребности в воде. Такая программа, названная REQWAT, была разработана в проекте WUFMAS и усовершенствована в проектах CAWA, PEER, SATREPS (cawater.info-net) . Программа REQWAT основана на алгоритме расчета водного баланса ФАО, но уже с учетом в водном балансе грунтовых вод.

Входные параметры для моделей водопотребления получены инновационными методами, основанными на создании модели поверхности земли (почвы), и фиксировании фаз роста и развития растений на основе оценки водно-энергетического баланса на исследуемой территории.

Исследования включают:

- Выбор пилотного объекта.
- Методологии сбора информации, выбор и сбор исходной информации на пилотных участках.
- Сбор исходных данных: климат, почвенный покров, уровень грунтовых вод.
- Гидромодульное районирование территории.
- Расчет водопотребления выращиваемых с/х культур и сбор исходной информации на пилотных участках.

Объект исследования Элликалинский район Каракалпакии

Рассматриваемая территория Приаралья характеризуется засушливым климатом, засоленными почвами, местами близким залеганием минерализованных грунтовых вод, недостатком водных ресурсов. Неправильное орошение засоленных земель в условиях, минерализованных с высоким уровнем грунтовых вод приводит к вторичному засолению почв.

Избыточное увлажнение или недостаточное орошение приводит к засолению почв и снижению продуктивности земель.

Научно обоснованный режим орошения, основанный на моделировании водного баланса, позволит исключить возможные негативные последствия. Изучение инновационных методов мониторинга параметров моделирования и засоленности почвы и их применение приблизит к решению проблемы.

Результаты

Гидромодульное районирование. Определение требований на воду орошаемых земель для планирования и распределения воды из ирригационной системы производится на основе

гидро модульного районирования. Гидро модульное районирование – это районирование территории на таксонометрические единицы (ГМР) по климатическими данным, почвенным характеристикам в сочетании с гидрогеологическими и другими природными и ирригационно-хозяйственными особенностями территории. Последнее гидро модульное районирования территории Узбекистана было проведено в 1986-1989 годах. [Беспалов, 1986] . Применяя современные методы расчета водопотребления оросительных и поливных норм, сроков и норм поливов на основе компьютерных моделей в среде ГИС, была разработана методика, по которой осуществляется корректировка границ гидро модульных районов и режимов орошения. Работа позволила предложить пользователям-практикам карту гидро модульных районов и таблицы рекомендованных сроков полива, поливных и оросительных норм по средним показателям (климата, сроков сева и др.), а также адаптированную программу расчета водопотребления, позволяющую корректировать режим орошения на сложившуюся ситуацию.

Учитывая, что особенности природно-хозяйственных условий, определяющие гидрографическое районирование, являются динамичными, гидро модульные зоны не могут рассматриваться как неизменные, и периодически должен проводиться их периодический пересмотр. В качестве такого пересмотра используется анализ степени изменчивости отдельных факторов.

Глубина залегания грунтовых вод. На основе анализа трехлетних наблюдений (2009-2021 гг.) за УГВ с 10-дневной периодичностью замеров, наибольший УГВ наблюдается летом, а наименьший - в зимний период (исключение составляют территории, подверженные воздействию дренажных вод, где уровень воды повышается в период зимнего выщелачивания солей - промывка). Среднегодовой УГВ <2 м покрывает около 31% орошаемых земель Элликкаллинского района (рис.1). Основная часть грунтовых вод "теряется" на испарение и транспирацию растениями из-за равнинного рельефа, пологих склонов на основной территории района исследования, а также затрудненного дренажа и сурового климата. Максимальное испарение грунтовых вод происходит в период с апреля по сентябрь, когда температура воздуха высокая, а глубина залегания УГВ небольшая. Часть грунтовых вод поступает на неорошаемые земли, озера и за пределы территории через коллекторно-дренажную сеть. Уровень грунтовых вод определяет объем дополнительной воды, поступающей в корнеобитаемый слой помимо выпадающей на орошение, но одновременно он влияет на увеличение или уменьшение соленакопления в зоне аэраций.

Недоучет этой составляющей может вызвать переполив, излишние затраты воды и, самое негативное последствие - вторичное засоление почв.

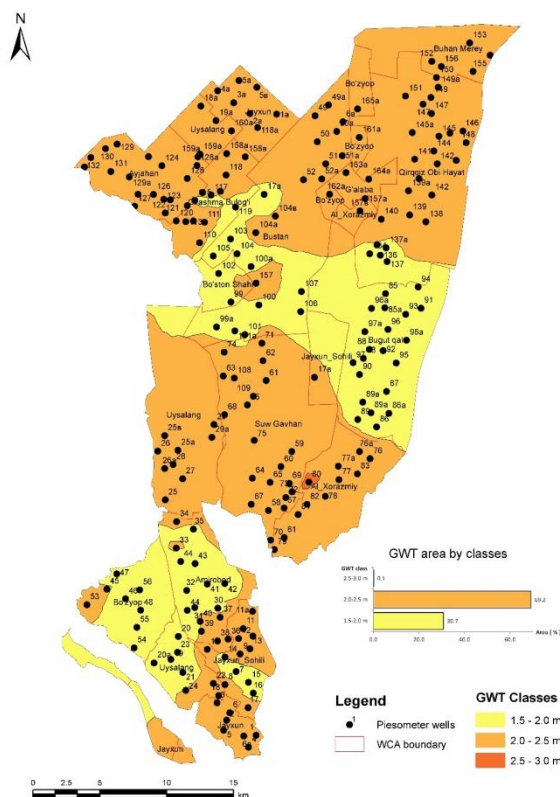
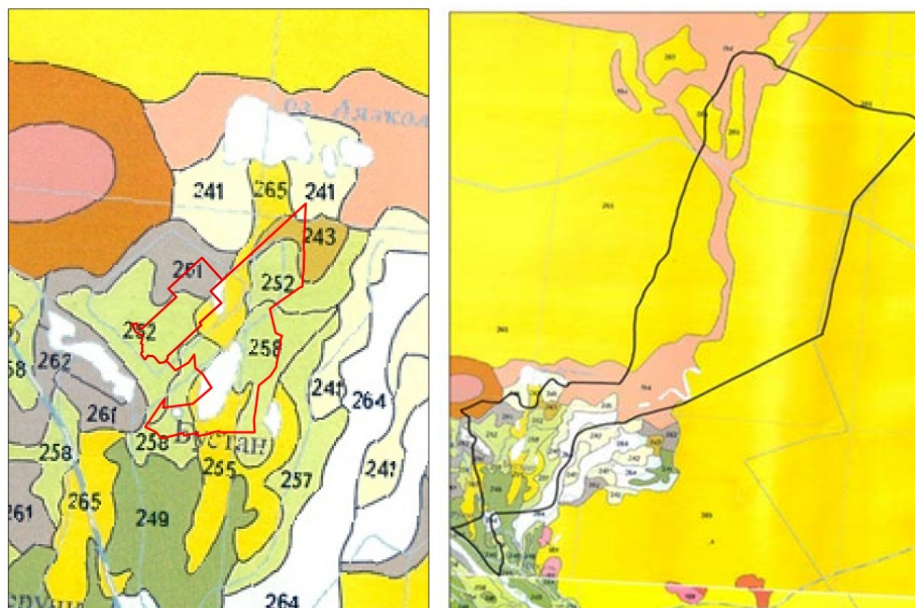


Рис. 1. Карта залегания УГВ Элликкалинского района (усредненная с 2019-2021 гг.)

В настоящее время в пределах Элликкалинского района существует 329 мониторинговых скважин для замера УГВ и минерализации грунтовых вод (МГВ).

Почвенный покров. В геоморфологическом отношении это плоская дельтово-аллювиальная равнина Амударьи, сложенная слоистыми аллювиальными отложениями Элликкалинского района представлен луговыми, такырно-луговыми, залежные и различной давности освоения и орошения. Большая площадь песков, с участками пустынно-песчаных почв (рис. 2).



■ 243	Такырно-луговые и лугово-такырные почвы (целинно-залежные) преимущественно среднесуглинистые и легкосуглинистые, сильно-и среднесолончаковые
■ 251	Староорошаемые луговые аллювиальные почвы легкосуглинистые и супесчаные, сильнозасолённые с пятнами очень сильнозасолённые
■ 252	Новоорошаемые луговые аллювиальные почвы тяжелосуглинистые, иногда глинистые, слабозасолённые, местами промытые
■ 258	Новоорошаемые луговые аллювиальные почвы легкосуглинистые и супесчаные, сильнозасолённые с пятнами очень сильнозасолённых
■ 265	Пески полужакреплённые и незакреплённые грядовые, бугристые и барханные с участками пустынных песчаных почв

Рис. 2. Почвенная карта Элликалинского района

Построение карты гидромодульных районов. Определение оросительных норм сельскохозяйственных культур в странах ЦАР основывается на гидромодульном районировании территории, включающем следующие таксономические единицы (Табл. 1). Отличительными признаками ГМР являются мощность мелкоземистого слоя, гранулометрический состав, строение и сложение почв и глубина залегания грунтовых вод, влияющие на капиллярный подток влаги в корнеобитаемую зону, и запасы воды при предельно-полевой влагоемкости.

Таблица 1

Гидромодульное райони́рование

Гидромод. район	Характеристика почвы
<u>Аэтоморфные почвы (УГВ>3 м)</u>	
I ^a	Очень маломощные, сильнокаменистые разные по гранулометрическому составу
I	Маломощные (0,2-0,5 м) среднекаменистые различного гранулометрического состава на песчано-галечниковых отложениях и на гипсах, а также мощные песчаные
II	Среднемощные слабокаменистые разные по гранулометрическому составу на песчано-галечниковых отложениях и гипсах; мощные супесчаные и легкосуглинистые
III	Мощные средние, тяжелосуглинистые и глинистые
<u>Полугидроморфные почвы (УГВ 2-3 м)</u>	
IV	Мощные песчаные и супесчаные, а также мало- и среднемощные разного гранулометрического состава
V	Мощные легко- и среднесуглинистые однородные; тяжелосуглинистые, облегающиеся книзу
VI	Мощные тяжелосуглинистые и глинистые плотные, однородные; разные по гранулометрическому составу, слоистые по строению
<u>Гидроморфные (УГВ 1-2 м)</u>	
VII	Мощные песчаные и супесчаные, а также мало- и среднемощные разного гранулометрического состава
VIII	Мощные легко- и среднесуглинистые однородные; тяжелосуглинистые, облегающиеся книзу
IX	Мощные тяжелосуглинистые и глинистые плотные, однородные; разные по гранулометрическому составу, слоистые по строению

Гидромодульное райони́рование было откорректировано на новые условия, с использованием картографической основы: областной и районной (масштаб 1:200 000; 1:100 000; 1:50 000).

Работа с такой основой позволяет уточнить территориальное расположение гидромодульных районов и откорректировать таблицу рекомендованных режимов орошения. Гидромодульное райони́рование или построение карты гидромодульных районов проводилось путем наложения в системе ГИС двух картографических слоев: почва и уровень грунтовых вод. В зависимости от наличия исходных характеристик, их детализации, возможно следующие варианты их использования построения карты ГМР и расчета водопотребления.

Вариант 1. Возможно использовать почвенную карту с выделенными почвенными разностями, в характеристиках которых указан гран. состав. Для перевода в классификацию ФАО, в этом случае использовать полученное соотношение двух классификаций для условий Центральной Азии [проект WUFMAS, 1997,1998 cawater-info.net] (табл. 2, рис. 2, 3, 4, 5).

Таблица 2

Величины доступной почвенной влаги и скорости инфильтрации по почвам различного гранулометрического состава в Центральной Азии (WUFMAS)

Класс почвы по мехсоставу (USDA)		AWC (1) мм/м	Скорость инфильтрации (2) мм/сутки
Z	Пыль	160	144
ZL	Пылеватый суглинок	160	192
ZC	Пылеватые глины	170	48
ZCL	Пылевато-иловатые суглинки	160	120
L	Суглинки	155	240
SL	Опесчаненные суглинки	145	480
LS	Супеси	100	720
fS	Мелкий песок	80	960
cS	Крупный песок	60	2400
gS	Гравелистый песок	40	4800
SCL	Опесчаненный иловатый суглинок	190	240
CL	Иловатый суглинок	180	192
C	Глина	210	12



Рис. 3. Карта уровня грунтовых вод, Элликкала

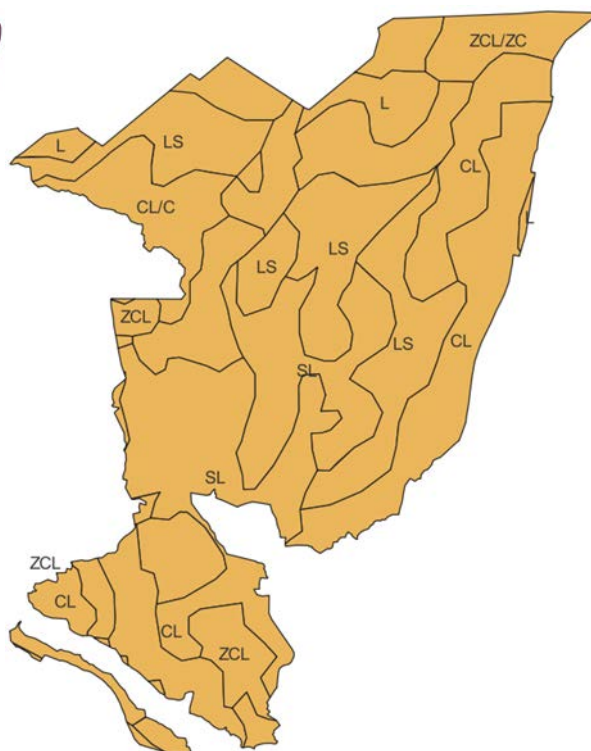


Рис. 4. Контуры гранулометрического состава

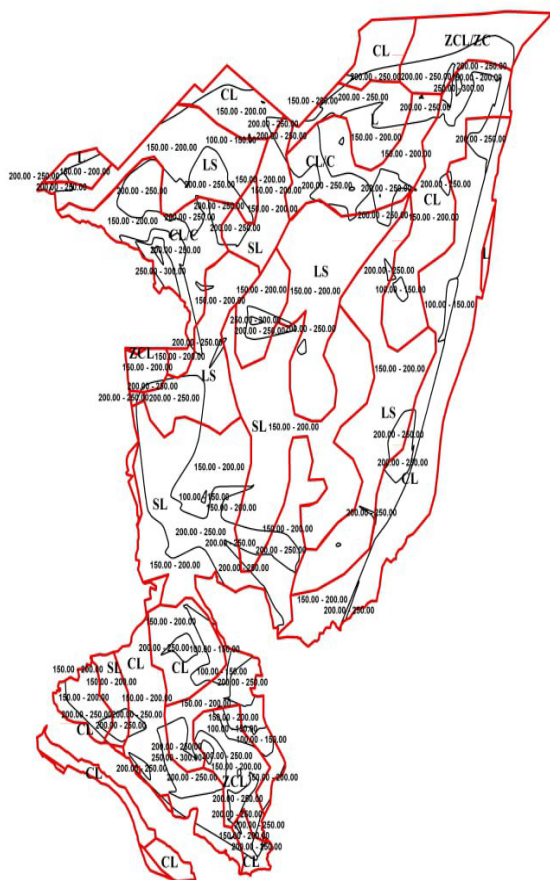


Рис. 5. Выделение контуров ГМР

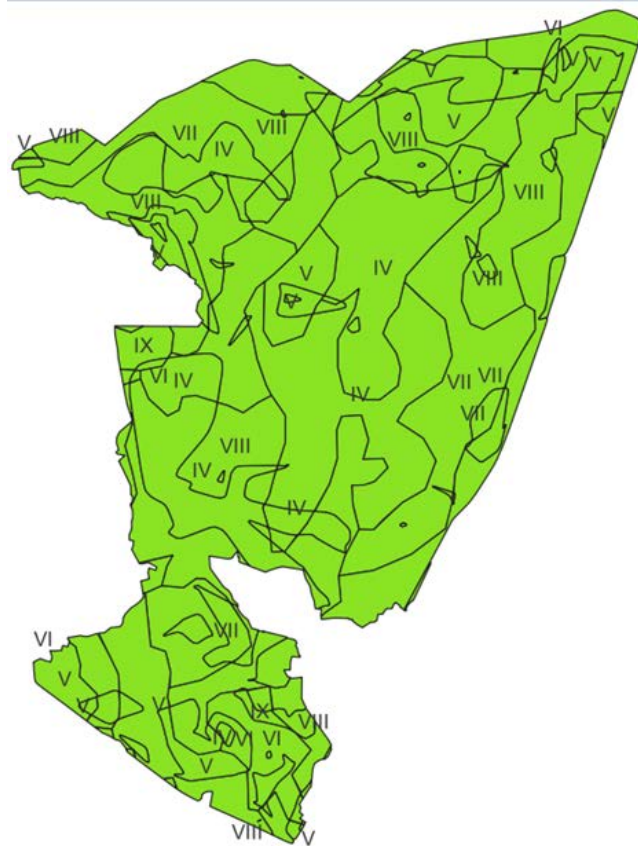


Рис. 6. Карта гидромодульных районов
Элликалинского района

Вариант 2. Экспликация к почвенным картам содержит не только название разности почв, но и результаты анализов гранулометрического состава, содержание почвенных гранулометрических фракций. Такой детальный исходный материал был необходим для обеспечения программы информацией по гранулометрическому составу почв для перехода от классификации [Качинский, 1958], принятой в нашей практике, к классификации ФАО. Пересчет фракций проводился по специально написанной для этой цели программе MACRO [WUFMAS, 1997, sawater-info.net] или по треугольнику ФЕРРЕ [Шеин, 2005].

Новая почвенная карта, карта гидромодульных районов построены в масштабе 1:200000, достаточном для описания территории в 100 тыс. га (рис. 4, 6).

Таблица 3

Перевод классификации гранулометрического состава

УГВ	Гранулом. состав	Контур	Г.М.Р
100-150	LS	257,262,258,249,	VII
	SL	265,249	VIII
150-200	L	178,243,262	VIII
	ZCL/ZC	194	VIII
	ZCL ,	261, ,255	IX
	CL/C	252	VIII
	CL	264,245,241,244	VIII
200-250	L	178,243,	V
	CL/C	252,	V
	LS	257,262,258	IV
	SL	265,249	IV
	CL	264,245,241,244	V
	ZCL	261,255	VI
	ZCL/ZC	194	VI
250-300	CL/C	252	V
	SL	249	IV
	CL	241,244	V
	ZCL	255	VI
Глубже 300	CL/C	252	III

Следующим шагом является детализация гидромодульного районирования в связи с реструктуризацией хозяйств, формированием фермерских хозяйств и организацией АВП, кластеров. Так как заявки на воду поступают от фермеров, они совместно с гидротехником и агрономом составляют таблицу (табл. 3), в которой по каждому отводу в АВП указываются подвешенная к нему площадь с делением её на ГМР. Затем, каждый гидромодульный район, в свою очередь, делится на площади под каждой конкретной культурой. Эти таблицы должны явиться исходными для обобщения и суммирования площадей ГМР по каналу в привязке к структуре посева.

План водопользования формируется первоначально фермерами на уровне АВП, кластера. на основе распределения площадей по гидромодульным районам. Такая детализация требует работы на основе картографического материала в масштабе 1:10 000, 1:25 000.

Классификация территории по УГВ проводилась на основании состояния УГВ на 1 апреля. Для большей статистической достоверности были использованы результаты наблюдений гидромелиоративной службы по Элликкалинскому району Узбекистана за последние 3 года. Средствами ГИС были составлены карты расположения наблюдательных

скважин и собран материал по наблюдениям УГВ в этих скважинах. Данные УГВ на 1 апреля каждого года за последние 3 лет затем были осреднены. По осредненным данным была построена карта изолиний УГВ для следующих градаций: 0,0–1,0 м; 1,0–1,5 м; 1,5–2,0 м; 2,0–3,0 м; 3,0–5,0 м; > 5 м.

Затем карта была переведена в электронный формат в виде Shape-файла.

Расчет режима орошения программой REGWAT (модифицированной версией CROPWAT [проект WUFMAS, 1997,1998 cawater-info.net]). Потребности сельскохозяйственной культуры в воде определяется как количество воды, требующейся для удовлетворения расхода воды на эвапотранспирацию культуры (ЕТс.) Для расчета ЕТс требуется трехстадийный метод.

Программа CROPWAT рассчитывает суточную эвапотранспирации культуры (ЕТс) на основе рассчитанной эвапотранспирации гипотетической эталонной культуры, которой является трава, выращиваемая в хороших условиях (ЕТо) и как бы растущая на том же поле, что и реальная культура. Расчёт проводится при помощи переходного коэффициента для конкретной культуры. По международному соглашению ЕТо оценивается в программе CROPWAT с помощью метода Пенмана Монтейна , Этот метод учитывает радиацию по количеству часов солнечного сияния и температуру воздуха и затем из рассчитанной величины эвапотранспирации с помощью корректировки на воздействие скорости ветра и относительной влажности воздуха получают эвапотранспирацию эталонной культуры.

Расчет производится следующим образом.

Первоначально определяется потенциальная эвапотранспирация, зависящая только от климата. Модифицированный метод Пенмана Монтейна предлагает лучшие результаты. Ниже приводится формула определения эталонной эвапотранспирации.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

где

ET_o - эталонная эвапотранспирация [мм сут⁻¹];

R_n - чистая радиация на поверхности растений [МДж м⁻² сут⁻¹];

G - плотность теплового потока почвы [МДж м⁻² сут⁻¹];

T - среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [°C];

u_2 - скорость ветра на высоте 2 м [м с⁻¹];

e_s - давление пара насыщения [кПа];
 e_a - фактическое давление [кПа];
 $(e_s - e_a)$ - дефицит давления пара насыщения [кПа];
 Δ - уклон кривой давления пара [кПа °C⁻¹];
 γ - психрометрическая постоянная [кПа °C⁻¹].

Следующий шаг расчета, учет эвапотранспирации культуры - ***ETact***

$$ETact = ETo * Kc \quad (2)$$

где ETo –или иначе потенциальная эвапотранспирация, Kc коэффициент культуры, зависящий от вида культуры.

Недостатком программы CROPWAT является то, что она не предназначена для пакетной обработки расчетов потребности сельскохозяйственных культур в воде.

Возникла необходимость иметь пакетную версию CROPWAT.

Важный вклад в создание модели CROPWAT был сделан следующим образом:

1. Подход, имитирующий пакетную работу программы.
2. Макроинтерфейс в MS Access, облегчающий извлечение входных данных.
3. Добавлен элемент в расчет водного баланса - вклад подземных вод.

Модифицированная версия названа REQWAT .

В общем случае водный баланс выражается как:

$$ET \text{ (эвапотранспирация)} = I \text{ (осадки)} + P \text{ (орошение)} + CR \text{ (вклад подземных вод)} \quad (3)$$

Испарение с поверхности почвы и транспирация истощают запасы влаги в корнеобитаемом слое, который формируется за счет орошения, осадков и пополнения из грунтовых вод,

Формула Харченко –Лактаева с модификацией Хорста:

$$\begin{aligned}
 Contr &= a * ETo / e^{(b * (D - R))} & D > R \\
 Contr &= ETo & D \leq R
 \end{aligned} \quad (4)$$

Ниже приводится пример расчеты программой для восьмого гидромодульного района , где проявляется влияние подпитки из грунтовых вод для хлопчатника (Табл 4).

Имя поля	Почва	КПД поля %	Дата расчета	Культура	Допуст.истощ. %	Ущерб %	Сев	Объем м ³ /га	Эфф. осадки мм	Подпитка мм	Етс за вег. мм	Конец вег.
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	20	17	2025.04.20	3638	16,43	372,09	780	2025.11.1
Имя поля	ПОЧВА	КПД %	ДАТА РАСЧЕТА	КУЛЬТУРА	№ ПОЛИВА	Дата полива	НОРМА м ³ /га	КОРНИ м	УГВ см	ЭФФ.ОСАДКИ мм	ПОДПИТКА ИЗ ГВ мм	Етс мм
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	1	2025.06.24	1084	1,2	173,0343956	10,96	68,7	173,36
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	2	2025.07.29	1277	1,2	173,0343956	0,91	111,47	222,88
ПОЛЕ_8	8	0,85	2024.04.29	Хлопок	3	2025.09.05	1277	1,2	173,0343956	1,16	111,73	223,4

Оросительная норма составляет 3638 куб.м/га. В то же время по расчетам для второго гидромодульного района она составила 5373 куб. /га. Расчеты для каждого гидромодульного района, других культур приводится в приложении

Обсуждение результатов

Предлагаемая программа REQWAT [Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф, НИЦ МКВК ЦА, 2020] обеспечивает не только водопотребление на текущий момент времени, но и делать расчёт на будущее с учётом изменяющихся природных климатических условий, прежде всего климата [Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф. 2020]

Выполненная работа позволила уточнить границы гидромодульных районов по территории Элликалинского района и составить карту гидромодульных районов для практического применения.

Приведенная методика использования созданного программного продукта позволила уточнить резервы всей будущей водоподачи, выработать соответствующие нормы поливов, в результате чего возможно снижение объема водопотребления. Более того, продемонстрирована возможность и необходимость ежегодно уточнять режимы орошения на основе представленной методики с учетом того, что отличие реальных лет от среднеголетних показателей составляет до 20% по величине водоподачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидромодульное районирование и режимы орошения сельскохозяйственных культур по Ферганской области, под рук. Беспалова Н.Ф., “НПО Союзхлопок”. - Ташкент, 1986
2. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М., 1958.
3. Шеин Е.В. Курс физики почв. М., 2005.
4. Smith M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management // Food and Agriculture Organization of the United. irrigation and drainage paper.1992, № 46.

5. *Стулина Г.В., Солодкий Г.Ф.* Использование усовершенствованной методики ФАО для оценки водопотребления сельскохозяйственных культур в процессе орошения в Центральной Азии” / Под общ. ред. Проф. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК ЦА, 2020. – С.-127.