Л. Н. Побережский

ВОДНЫЙ БАЛАНС ЗОНЫ АЭРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ОРОШЕНИЯ

Гидрометеоиздат 1977

УДК 551.48 : 631.6

Ответственный редактор докт. техн. наук С. И. ХАРЧЕНКО

Рассматривается динамика основных элементов водного баланса зоны аэрации орошаемых полей под хлопчатником. Дается методика расчета испаряемости, суммарного испарения и влагозапасов зоны аэрации массивов под хлопчатником. Намечаются пути использования результатов воднобалансовых исследований для проектирования режима орошения хлопчатника и нагрузки на дренажные системы.

Книга рассчитана на специалистов, работающих в области гидрологии, агрометеорологии, мелиорации, гидрогеологии, а также на преподавателей и студентов соответствующих вузов.

The water balance base elements dynamics of the cotton irrigated fields aeration zone is considered. The methods of the evaporation estimation, estimation of the cotton huge tracts of land aeration zone sum evaporation and water supply are given. The ways of the water balance investigations results using for the projecting of the cotton irrigated regime and drainage systems loading are outlined.

The book is intended for the specialists working in the fields of hydrology, agrometeorology, land-reclamation, hydrogeology as well as for the lecturers and students of the same colleges.

П $\frac{40305\text{-}152}{069(02)\text{-}77}$ 32-77

© Гидрометеоиздат, 1977 г.

Моему учителю
Виктору Львовичу Шульцу
посвящаю

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О плане мелиорации земель на 1976—1980 гг. и мерах по улучшению использования мелиорируемых земель» отмечается, что в соответствии с последовательно осуществляемой программой дальнейшего развития сельского хозяйства мелиорация земель получила применение во всех важнейших сельскохозяйственных районах страны. Постановлением предусматривается большая работа по вводу в эксплуатацию новых орошаемых земель на фоне дальнейшей интенсификации сельскохозяйственного производства, в том числе производства хлопка-сырца. Лишь на территории первой очереди освоения Каршинской степи площадь дренируемых земель составит 200 тыс. га при общей протяженности закрытых горизонтальных дрен 8 тыс. км. Продолжится освоение целинных земель в Голодной, Джизакской степях, в Сурхан-Шерабадском районе и на других объектах, где производство хлопка-сырца ставится на индустриальную основу.

При всех очевидных достижениях в развитии мелиорации имеется и ряд неясных положений, научное обоснование которых зачастую отстает от темпов строительства и практики освоения мелиорируемых земель, что в свою очередь сдерживает быстрое и эффективное их использование. Прежде всего это относится к режиму орошения почв и дренажу, совокупное воздействие которых должно обеспечить мелиоративное благополучие территории.

Известно, что проектирование режима орошения и нагрузки на дренаж базируется на результатах комплексных водобалансовых и агрометеорологических исследований. Однако

в настоящее время нередки случаи, когда необходимые для проектирования показатели отсутствуют или основываются на эпизодических наблюдениях. Воднобалансовые исследования чрезвычайно трудоемки, требуют значительных затрат средств и времени, в результате чего при изысканиях зачастую лишь выборочно определяются отдельные элементы водно-солевого баланса для преобладающих почвенных разностей и гидрогеологических условий. Поэтому обоснование принятых в проектах решений не всегда сопровождается достаточным объемом необходимого экспериментального материала.

В книге сделана попытка систематизировать опытные данные, характеризующие условия формирования основных элементов водного баланса слабозасоленных, главным образом среднесуглинистых почв под хлопчатником. Автор надеется, что установленные закономерности будут способствовать совершенствованию и удешевлению изысканий для обоснования проектов орошения и освоения земель, а также, если это необходимо, оперативной корректировке проектных предпосылок.

Для решения поставленных задач привлечены материалы натурных наблюдений, проводившихся при участии или под руководством автора главным образом на землях нового освоения Голодной и Каршинской степей. Помимо этих данных, использованы результаты многолетних наблюдений агрометеорологических станций системы Гидрометслужбы, а также многочисленные литературные и архивные источники.

Оборудование опытно-производственных участков гидрометрическими сооружениями для учета ирригационного притока и коллекторно-дренажного оттока, метеорологическими и актинометрическими приборами для определения суммарного испарения методом теплового баланса, а также армированными скважинами для измерений влажности почвогрунтов нейтронным методом и глубины залегания уровня грунтовых вод позволило получить массовую информацию, обобщение которой, помимо самостоятельного интереса, может способствовать дальнейшему совершенствованию проектов орошения новых земель.

Комплексные воднобалансовые исследования, выполняемые институтом Средазгипроводхлопок на орошаемых землях, еще далеко не завершены. Растет сеть опытно-производственных участков, совершенствуется методика наблюдений и расчетов, испытываются и внедряются новые приборы и оборудо-

вание. Однако в связи с интенсификацией проектных и научно-исследовательских работ представляется полезным обобщить уже полученные результаты и попытаться наметить пути дальнейших исследований.

Стремление увязать цель и результаты воднобалансовых исследований с основными мелиоративными проблемами привело к необходимости выделить вопросы проектирования режима орошения хлопчатника и нагрузки на дренаж в самостоятельную главу, где приведены и примеры расчета, соответствующие бороздковому и дождевальному способам полива. При этом автор, не претендуя на всеобъемлющий охват затронутых вопросов, рассматривает свою работу как один из возможных путей обобщения экспериментального материала в форме, удобной для практического использования.

Помощь в расчетах и оформлении рукописи оказывали М. М. Короткова, В. О. Усманов, Л. П. Островерхов, А. М. Ляховский и другие товарищи. Всем им автор приносит искреннюю благодарность.

Автор выражает свою признательность С. И. Харченко за ряд ценных замечаний, высказанных как при первоначальном ознакомлении с рукописью, так и в процессе ее редактирования. Одновременно автор благодарит И. Г. Мушкина и Ю. Н. Иванова за ряд полезных советов и замечаний, высказанных при рецензировании.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ, ПРИНЯТЫХ В ТЕКСТЕ

H — глубина залегания уровня грунтовых вод
W — влажность почвы
x — атмосферные осадки
q — дренажный сток
μ — параметр водоотдачи (водовместимости) грунта
E_0 — испаряемость
E — суммарное испарение
$E_т$ — доля транспирации в суммарном испарении
I — доля грунтовых вод в суммарном испарении
h — мощность активного слоя почвы
M — оросительная норма
m — поливная норма
σ — среднее квадратическое отклонение
C_v — коэффициент вариации
ПВ — полная влагоемкость
КВ — капиллярная влагоемкость
НВ — наименьшая влагоемкость
ВРК — влажность разрыва капилляров
ВЗ — влажность завядания
ВПО — внутрипочвенное орошение
УГВ — уровень грунтовых вод

Глава 1

ВОДНОБАЛАНСОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ

Орошение и освоение земель неизбежно влечет за собой нарушение сложившегося в течение длительного времени равновесия в природе, в частности изменение структуры водного и солевого балансов зоны аэрации. Последнее применительно к районам с затрудненным естественным оттоком грунтовых вод вызывает подъем их уровня и засоление корнеобитаемого горизонта зоны аэрации. На землях, подкомандных Голодностепскому магистральному каналу, к 1925 г. засоленная площадь составляла 26% земель, а в 1934 г. внутрисистемное засоление охватило 40% (57 тыс. га) общей орошаемой и внутрисистемной неорошаемой площади [103]. В голодностепском совхозе «Пахта-Арал» уже в первый год орошения уровень грунтовых вод поднялся с 10 до 3 м и к 1952 г. 50% площади совхоза было охвачено вторичным засолением [227].

Эти примеры, которые легко умножить, настоятельно диктуют необходимость комплексных воднобалансовых исследований, которые бы охватывали всю диалектически единую систему почва—растение—атмосфера и способствовали разработке обобщенных критериев проведения необходимых мелиоративных мероприятий. Разработка подобных критериев базируется на объективных результатах экспериментов непосредственно на объектах орошения.

По-видимому, первое детальное исследование элементов водного баланса, включая суммарное испарение, выполнил В. Л. Шульц [264] применительно к Шахрудской оросительной системе Бухарского оазиса Узбекистана. Обработав результаты натурных наблюдений за режимом водоподачи, атмосферных осадков и уровня грунтовых вод и решив уравнение водного баланса относительно испарения, В. Л. Шульц определил удельный вес отдельных элементов водного баланса оросительной системы, подчеркнув решающее значение водоподачи, подчиненную роль атмосферных осадков, а также тот факт, что суммарное испарение в условиях орошения соизмеримо с водоподачей.

В. Н. Димо [71], работая в составе комплексной экспедиции Почвенного института им. Докучаева, проводила массовые

измерения влажности почв в течение вегетационного периода хлопчатника и люцерны. В результате было установлено, что вегетационные поливы характеризуются не только пиками уровня грунтовых вод, но и пиками капиллярно подпертой воды, а режим влажности по профилю определяется постоянным чередованием восходящих и нисходящих токов.

В программу экспедиции в Пахтааральский оазис Голодной степи, организованной ГГО им. Воейкова (1952 г.), входило определение составляющих теплового баланса деятельной поверхности на орошаемых хлопковых полях и перелогах, а также выявление основных качественных и количественных закономерностей изменения теплового баланса и метеорологических элементов в приземном слое воздуха, которые возможны при орошении. Эти исследования способствовали улучшению методики учета метеорологических условий при нормировании орошения.

Результаты исследований СоюзНИХИ в Ферганской долине, обобщенные С. Н. Рыжовым [209], показали необходимость дифференциации режима орошения по водно-физическим свойствам почвенного покрова. Автор установил верхний и нижний пределы оптимального увлажнения почвы при культуре хлопчатника, а также составил водный баланс хлопкового поля при различной глубине стояния грунтовых вод.

Ф. А. Муминов [164], работая в условиях Ташкентской области при глубоком залегании уровня грунтовых вод и хорошем естественном их оттоке, изучал изменение радиационного режима, тепло- и влагообмена, суммарного испарения и его составляющих, а также элементов микроклимата хлопкового поля в зависимости от режима орошения и состояния растительного покрова. Автор установил количественные связи элементов продуктивности хлопчатника и его урожая с основными составляющими радиационного и теплового балансов деятельной поверхности.

Весьма важной вехой в развитии мелиоративной гидрологии явилась монография С. И. Харченко, первое издание которой вышло в свет в 1968 г. [246]. Это, по-видимому, первая работа, в которой исследование закономерностей формирования основных элементов водного баланса зоны аэрации орошаемых земель логически завершается разработкой методики расчета оросительных норм и поливного режима сельскохозяйственных культур.

С момента призыва М. М. Крылова [128] к систематическому количественному определению основных элементов водного баланса орошаемых почв в Средней Азии проделана большая работа, позволившая существенно уточнить проекты орошения и освоения новых земель. В настоящее время только в Узбекистане функционирует 10 гидрогеологических станций Министерства геологии, эксплуатирующих 413 лизиметрических уста-

новок и 1200 скважин для наблюдения и изучения режима грунтовых вод [150].

В последние годы широкие мелиоративные исследования на вновь осваиваемых землях проводит САНИИРИ.

На опытно-производственных участках института Средазгипроводхлопок исследуются элементы техники полива, параметры оросительной сети, режим орошения хлопчатника, грунтовых вод и влажности зоны аэрации, дренажный сток, суммарное испарение и его составляющие, а также режим метеорологических элементов приземного слоя атмосферы. Материалы синхронных наблюдений, поступающие с опытно-производственных участков, расположенных в различных гидрогеологических, почвенно-климатических и иных условиях, а также характеризующие различные способы орошения, дают возможность проследить за динамикой водного режима зоны аэрации, установить закономерности пространственного распределения основных ее элементов.

На орошаемой территории имеется сеть агрометеорологических станций Гидрометслужбы, однако она редкая и объем наблюдений там весьма ограничен.

Уравнение водного баланса орошаемого поля с детальным анализом его составляющих приведено в монографии С. И. Харченко [246]. Для решения конкретных мелиоративных задач инструкция по проектированию оросительных систем рекомендует составлять уравнения баланса почвенных и грунтовых вод применительно к землям, подлежащим мелиорации, и с существующим орошением.

В частности, уравнение баланса почвенных вод орошаемого поля записывается в виде

$$\Delta W_{\text{п}} = П - О - e + М + x - E - Q,$$

где $\Delta W_{\text{п}}$ — изменение запасов почвенных вод в границах рассматриваемой территории, $П$, $О$ и e — приток, отток и испарение поверхностных вод соответственно, $М$ — оросительная норма, x — атмосферные осадки, E — суммарное испарение, Q — вертикальный водообмен между почвенными и грунтовыми водами.

Первые три члена правой части этого уравнения могут быть исключены, если приходной составляющей водного баланса орошаемого массива является лишь ирригационная водоподача в сумме с атмосферными осадками. В межполивные интервалы приходной статьей баланса является и величина Q, равная произведению параметра водоотдачи грунта на разность глубин залегания уровня грунтовых вод за расчетный период времени.

Представляется целесообразным использовать следующее уравнение баланса почвенно-грунтовых вод:

$$(M + x) - E \pm \Delta W \pm Q = 0.$$

В процессе экспериментальных исследований уравнение водного баланса, характеризующее частный случай закона

сохранения вещества, нередко применяется для определения какого-либо одного элемента. При этом мощность изучаемого слоя почвогрунта и продолжительность расчетного интервала определяются конкретными условиями эксперимента и степенью точности оценки составляющих баланса.

Стремление отождествить деятельный (расчетный) слой с зоной аэрации в большинстве случаев оправдано, но в первые годы эксплуатации оросительных систем или в районах с хорошим естественным оттоком грунтовых вод мощность зоны аэрации нередко бывает настолько велика, что учет, например, динамики влагозапасов по всему почвенно-грунтовому профилю оказывается затруднительным. Поэтому мощность расчетного слоя выбирают так, чтобы полностью учесть вертикальный поток влаги, что обычно достигается установлением горизонта зоны аэрации с постоянной или слабо изменяющейся во времени влажностью. Однако подобный путь может привести к существенным ошибкам, ибо слабо изменяющаяся влажность может быть следствием подпитывания со стороны временного зеркала грунтовых вод, нередкого в условиях слоистых почв. На это обстоятельство обращает внимание А. И. Будаговский [34]. С. Ф. Аверьянов [6], говоря о кажущемся постоянстве влаги, приводит образный пример с керосиновой лампой, в которой влажность фитиля неизменна, но расход горючего очевиден.

В условиях орошения, когда на поверхность почвы поступает значительное количество воды за короткий интервал времени, важную роль играет и гравитационное просачивание за пределы расчетного слоя. Например, при мощности зоны аэрации около 20 м за пределы 4-метрового слоя, сложенного главным образом средними суглинками, сбрасывается до 30% влаги [184].

Выбор той или иной продолжительности расчетного интервала неизбежно влечет за собой соответствующее изменение значимости отдельных составляющих баланса. Если для средних многолетних годовых балансов мелиоративной системы можно принять за нуль изменение запасов влаги в зоне аэрации и грунтовых вод, то применительно к коротким отрезкам времени (месяц, декада) степень точности учета этих элементов во многих случаях определяет эффективность воднобалансовых расчетов.

Критическое отношение ряда авторов к возможности использования метода водного баланса, например, для расчетов суммарного испарения за короткие отрезки времени обусловлено, в частности, значительными погрешностями оценки приращения запасов влаги термостатно-весовым методом, требующим большой повторности, особенно в условиях неоднородных почв. Попытки определить необходимую повторность бурения лишь привели к выводам об ограниченной области применения метода водного баланса. Так, А. К. Филиппова [240] пришла к заключению о необходимости 160-кратной повторности для верхних

и 120-кратной для более глубоких горизонтов почвы. В этом случае погрешность измерений составит 10 мм на 1 м слоя почвы при обеспеченности 80—85%. Л. А. Разумова [195] рекомендует дифференцировать рассчитанную повторность применительно к датам начала и конца межполивного интервала.

Все эти авторы имеют в виду термостатно-весовые определения влажности почвы. Поскольку этот метод позволяет определить влажность небольшого случайно выбранного объема почвы, то под повторностью понимается как совокупность скважин для объективного определения начальных и конечных влагозапасов в точке, так и совокупность точек для оценки средней влажности на заданной площади и с заданной погрешностью.

Использование нейтронного метода позволяет определять приращение влажности как функцию времени, но не пространственной изменчивости. Поэтому повторность замеров ограничивается определением лишь совокупности точек, которая в свою очередь устанавливается в зависимости от исследуемой площади, времени года, мощности расчетного слоя почвогрунта и заданной погрешности определения средних влагозапасов.

Дальнейшее совершенствование методов натурного учета элементов водного баланса зоны аэрации, равно как и методов обработки исходных данных, будет способствовать расширению области использования воднобалансовых соотношений как в научных, так и в практических целях.

Глава 2

ВЛАГООБМЕН ГРУНТОВЫХ ВОД С ЗОНОЙ АЭРАЦИИ

Под влагообменом грунтовых вод с зоной аэрации обычно понимают совокупность процессов, характеризующих питание грунтовых вод в период полива (нисходящий ток) и расход грунтовых вод в зону аэрации в межполивные интервалы (восходящий ток). Оба процесса изменяют глубину залегания уровня грунтовых вод (УГВ), а следовательно, и мощность зоны аэрации, ее влажность и засоленность.

Известно, что интенсивному орошению больших массивов сопутствует быстрый подъем грунтовых вод в условиях недостаточного естественного оттока. Основными причинами подъема УГВ при орошении являются фильтрация из постоянных и временных каналов, а также непосредственно с полей орошения, причем роль и значение этих причин могут меняться в зависимости от эффективности противофильтрационных мероприятий на оросительных системах и физических свойств грунта. По мнению А. А. Рачинского [197], в основном до 25—30% потерь воды на питание грунтовых вод приходится на поливные участки, но А. Г. Владимиров [49] считает решающей причиной подъема УГВ фильтрацию из каналов. В то же время, по данным Гидроингео (А. С. Шамуков), питание грунтовых вод на площадях, подкомандных Южноголодностепскому каналу, на 90% обеспечивается фильтрацией с орошаемых полей и лишь на 10% фильтрацией из каналов.

1. Изменение глубины залегания грунтовых вод под влиянием поливов

При проектировании нагрузки на дренаж весьма важным является прогноз изменения глубины УГВ в связи с орошением. Для составления такого прогноза в институте Средазгипроводхлопок широко используется формула С. Ф. Аверьянова [125], характеризующая свободную емкость зоны аэрации S:

$$S = \omega_1 y - \frac{2}{3}\frac{\omega_1 H_к}{\beta}\left[1 - \left(1 - \frac{\beta y}{H_к}\right)^{3/2}\right], \qquad (1)$$

где $\beta = 1 - (\omega_0/\omega_1)^2$, ω_1 и ω_0 — влажность почвы на нижнем и верхнем концах капиллярной каймы соответственно, y — глубина до уровня грунтовой воды, $H_к$ — высота капиллярного поднятия.

Произведение первых двух членов в уравнении (1) представляет собой запас влаги в зоне аэрации, соответствующий полной влагоемкости (ПВ) и численно равный общей пористости при отсутствии скоплений защемленного воздуха. Вычитаемое того же уравнения есть интегральный влагозапас в зоне капиллярной каймы.

Следовательно, уравнение (1) справедливо для условий, когда вся эпюра влажности представляет собой капиллярную кайму грунтовых вод, а влажность верхнего горизонта почвы равна ω_0. Но в естественных условиях даже при глубине УГВ меньше $H_к$ интенсивность расходования влаги верхним слоем почвы зачастую выше, чем интенсивность капиллярного подпитывания, в результате чего фактическая влажность почвы может быть меньше ω_0.

При отсутствии влагообмена с глубжележащими водоносными горизонтами, а также горизонтального влагообмена уравнение водного баланса орошаемого поля за период полива можно записать в виде

$$\mu \Delta H_{\uparrow} + y_0 = m - \Delta W - E' - q, \qquad (2)$$

где μ — параметр водоотдачи, ΔH — изменение глубины УГВ, y_0 — отток (растекание) бугра грунтовых вод, m — поливная норма, E' — испарение за время полива, ΔW — дефицит влаги в почве к началу полива, q — дренажный сток. Стрелкой показано направление перемещения зеркала грунтовых вод.

При использовании лизиметров количественное определение составляющих уравнения (2) становится затруднительным, особенно в условиях отсутствия учета дефицита влаги в монолите. Поэтому нередко основными факторами, определяющими питание грунтовых вод, считают размер поливной нормы и исходное положение УГВ. Например, В. М. Легостаев и Б. С. Коньков [142] определяли приращение УГВ при исходном его положении от 0,8 до 3,0 м и поливных нормах 700, 1000 и 1200 м³/га, получив при этом, что ΔH обратно пропорционально исходной глубине УГВ независимо от поливной нормы.

Н. А. Кенесарин [104, 105] считает эти данные заниженными и приводит свои фактические данные, из которых, так же как и из предыдущих, следует, что зависимость $\mu \Delta H/m = f(H)$ линейна и вся величина питания грунтовых вод за полив расходуется на их подъем, но последний равен нулю при исходной глубине УГВ 4 м против 3 м по данным В. М. Легостаева и Б. С. Конькова.

Значительный фактический материал, полученный большей частью на лизиметрах, приводится И. К. Киселевой [109], которая к числу причин изменения глубины УГВ при орошении, помимо уже отмеченных. относит фазу развития культуры и степень засоления почвы. Так, после укоса люцерны инфильтрация до глубины 1 м составила 30—42% поливной нормы при

засолении по хлору 0,02—0,03% и до 92% при втрое большем засолении. Та же норма, поданная до укоса, не вызвала подъема УГВ при слабом засолении, но при засолении 0,06—0,07% инфильтрация достигала 64%. Автор отмечает, что если в естественных условиях грунтовые воды, залегающие на глубине 2 м и более, реагируют на полив даже нормой 300 м³/га, то в лизиметрах поливная норма 500—600 м³/га вызывает инфильтрацию (5—17%) при засолении по хлору 0,02% только до глубины 1 м, но до 2 м при том же засолении инфильтрация отсутствует даже при поливах хлопчатника или люцерны нормой 800 м³/га.

Понятно, что отсутствие учета аккумуляции влаги в монолите лизиметра, а также возможной пристенной фильтрации, наличие которой в такого рода приборах показано, например, И. С. Шпаком [259], затрудняет обобщение этого материала.

Н. А. Кенесарин [105] отмечает, что подъем УГВ при поливе с уменьшением начальной глубины грунтовых вод, как правило, уменьшается, хотя данные автора не подтверждают сделанный им вывод. Но факт уменьшения амплитуды колебания грунтовых вод с приближением их к поверхности почвы очевиден и постоянно наблюдается в природе.

На рис. 1 изображена динамика глубины УГВ под хлопковым полем на землях голодностепского совхоза № 18 в 1967 г. (второй год орошения). К причинам различного хода УГВ по некоторым наиболее характерным скважинам мы вернемся ниже. Здесь хотелось бы отметить, что амплитуда изменения глубины УГВ за полив при нормах 3—4 тыс. м³/га может превышать 2 м, тогда как на Бешкентском опытном участке в Каршинской степи при глубине УГВ 100—140 см поливные нормы от 1000 до 3500 м³/га поднимали УГВ лишь на 20—40 см.

Близкое стояние грунтовых вод снижает дефицит почвенной влаги, и потому общие потери на инфильтрацию обратно пропорциональны исходной глубине УГВ $H_н$, но поскольку в этом случае возрастает роль y_0, то зависимость $\Delta H = f(H_н)$ неоднозначна.

На рис. 2 обобщены многолетние наблюдения за динамикой УГВ в период вегетации хлопчатника на опытных участках института Средазгипроводхлопок в Голодной и Каршинской степях. Как видно, общие потери оросительной воды на инфильтрацию быстро убывают с ростом мощности зоны аэрации, а подъем УГВ возрастает, хотя и не беспредельно. На основании данных рис. 2 можно полагать, что, например, при метровой мощности зоны аэрации на питание грунтовых вод расходуется около 70% поливной нормы, в том числе на подъем УГВ лишь 18%, а остальное (52%) на отток (растекание). Если исходная мощность зоны аэрации возрастает до 2 м, то те же значения равны 45, 25 и 20% соответственно, а начиная с $H_н = 3$ м практически вся инфильтрация оросительной воды фиксируется наблюдениями за динамикой УГВ.

Если отвлечься от влияния исходной мощности зоны аэрации, то окажется, что важнейшим фактором, определяющим величину подъема грунтовых вод за полив, является размер поливной нормы, причем независимо от способа подачи воды на поле (рис. 3). Этот вывод хорошо согласуется с данными И. С. Рабочева [194], показавшего для условий Чарджоуской области, что лишь изменение объема водоподачи за поливной сезон на 1000 м³/га влечет за собой соответствующее изменение глубины УГВ к концу того же года на 20 см.

Принято считать, что применение дождевальной техники исключает или существенно ослабляет питание грунтовых вод на орошаемых полях. Впервые в Средней Азии орошение хлопчатника дождеванием применено в голодностепском совхозе «Пахта-Арал», где за период 1957—1963 гг. поливные нормы составляли 300—600 м³/га, а подъем УГВ за полив при исходной глубине 2—3 м в подавляющем большинстве случаев не превышал 8 см [173, 190], и практически вся поливная норма расходовалась на пополнение запасов влаги в зоне аэрации. Если не считать кратковременных подъемов УГВ при поливах дождеванием, то можно говорить о прогрессивном снижении грунтовых вод в течение всего периода вегетации хлопчатника.

Повсеместно наблюдающееся незначительное питание грунтовых вод при орошении дождеванием является, по-видимому, следствием не способа орошения, а малых поливных норм, которые невозможно подать по бороздам. Поэтому точки, соответствующие дождеванию хлопчатника, располагаются на зависимости $\Delta H = f(m)$ вблизи минимальных значений ΔH (рис. 3).

Из того же рис. 3 видно, что малые поливные нормы, поданные на поле по трубкам-увлажнителям (внутрипочвенное орошение), обусловили подъем УГВ того же порядка, что и при дождевании, но увеличение поливной нормы до 1800 м³/га подняло УГВ на 47 см. В связи с этим представляет интерес второй вегетационный полив сезона 1974 г. на участке внутрипочвенного орошения (ВПО). В результате отсутствия контроля за водоподачей поливная норма превысила 4000 м³/га, и полив был прекращен, лишь когда вода местами выступила на поверхность почвы. За время этого полива грунтовые воды поднялись на 175 см при исходной глубине 265 см.

Известно, что орошение сельскохозяйственного поля осуществляется не одновременно на всей его площади, а по частям (тактам), и наивысший за время полива УГВ формируется, как правило, к концу полива. Анализ имеющегося натурного материала показывает (рис. 4), что в результате орошения 40% площади поля наивысший за полив УГВ формируется лишь на 10% площади. Если же площадь орошения составит 90%, то лишь половина поля будет иметь самые близкие за данный полив отметки горизонта грунтовых вод. В день окончания полива (орошено 100% площади) такие отметки имеют место на 75%

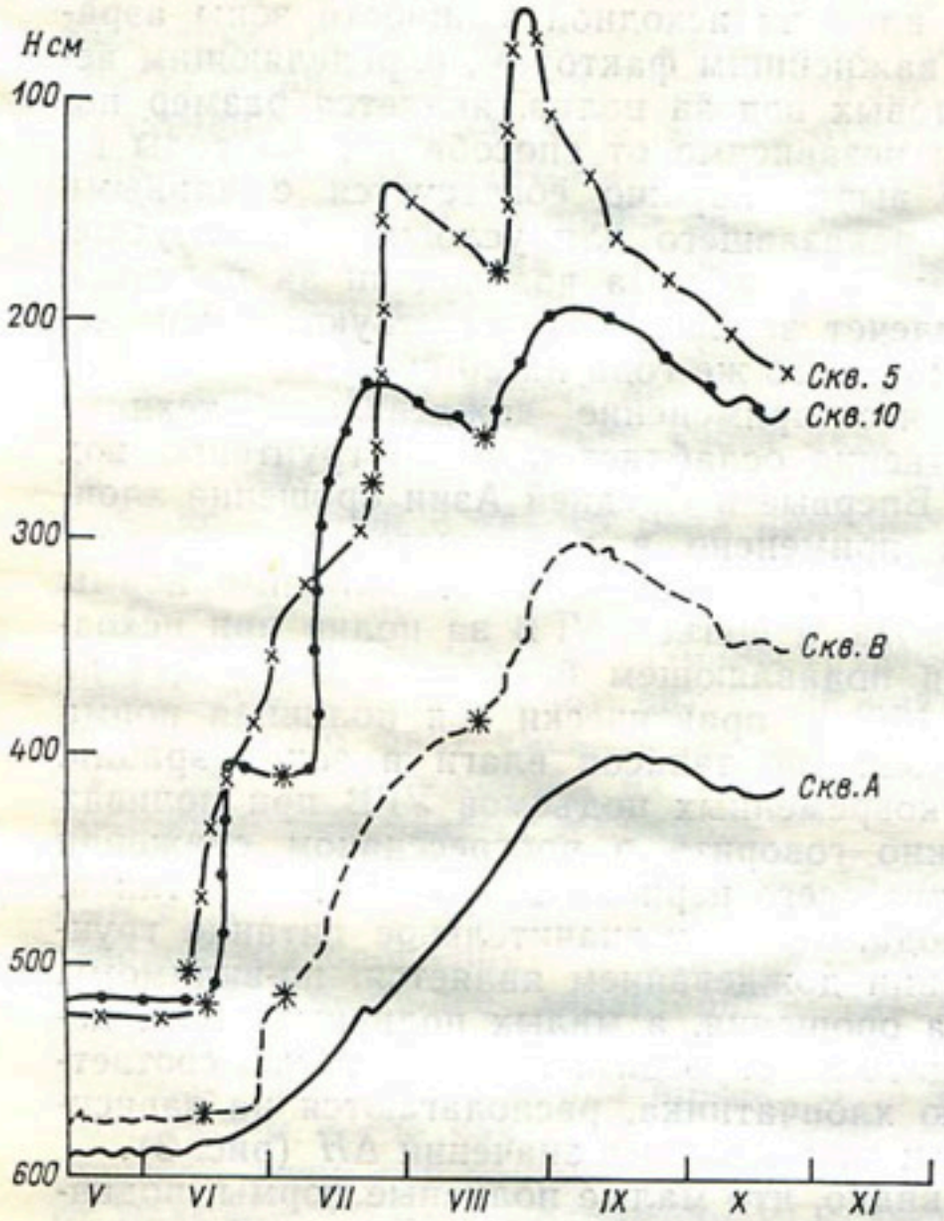


Рис. 1. Изменение глубины УГВ по некоторым скважинам на хлопковом поле голодностепского совхоза № 18 в 1967 г.

Звездочкой обозначена дата полива.

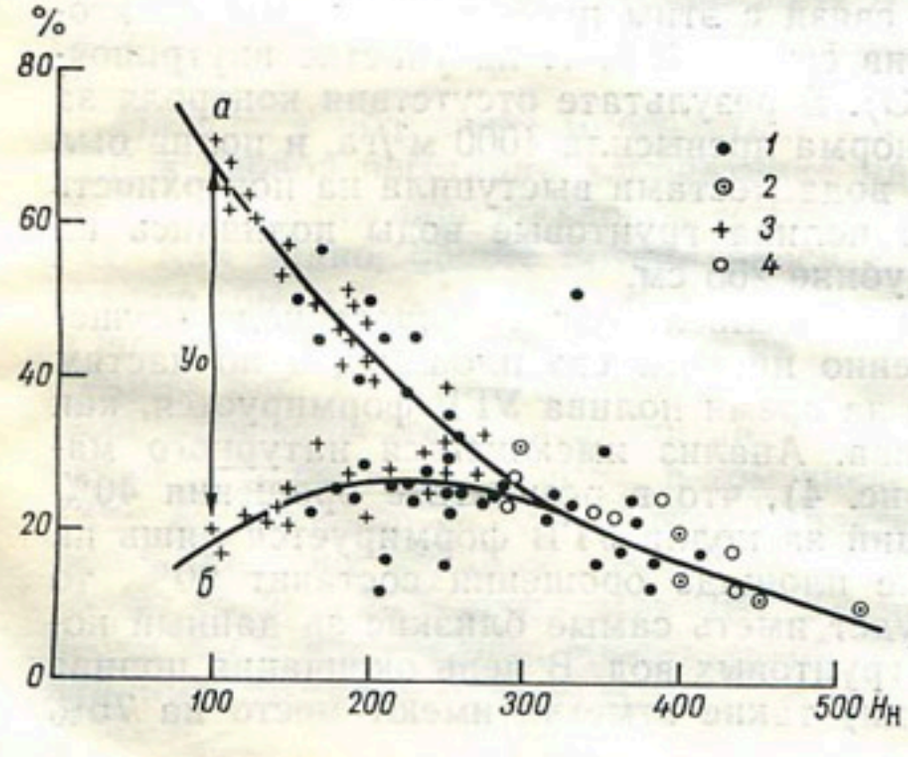


Рис. 2. Зависимость общего питания грунтовых вод (*а*) и его доли, израсходованной на подъем УГВ (*б*), от исходной глубины грунтовых вод (% от поливной нормы).

Голодная степь: *1* — совхоз № 1, 1971—1975 гг., *2* — совхоз № 18, 1967—1969 гг. Каршинская степь: *3* — колхоз «Москва», 1970—1975 гг., *4* — совхоз № 11, 1971—1974 гг.

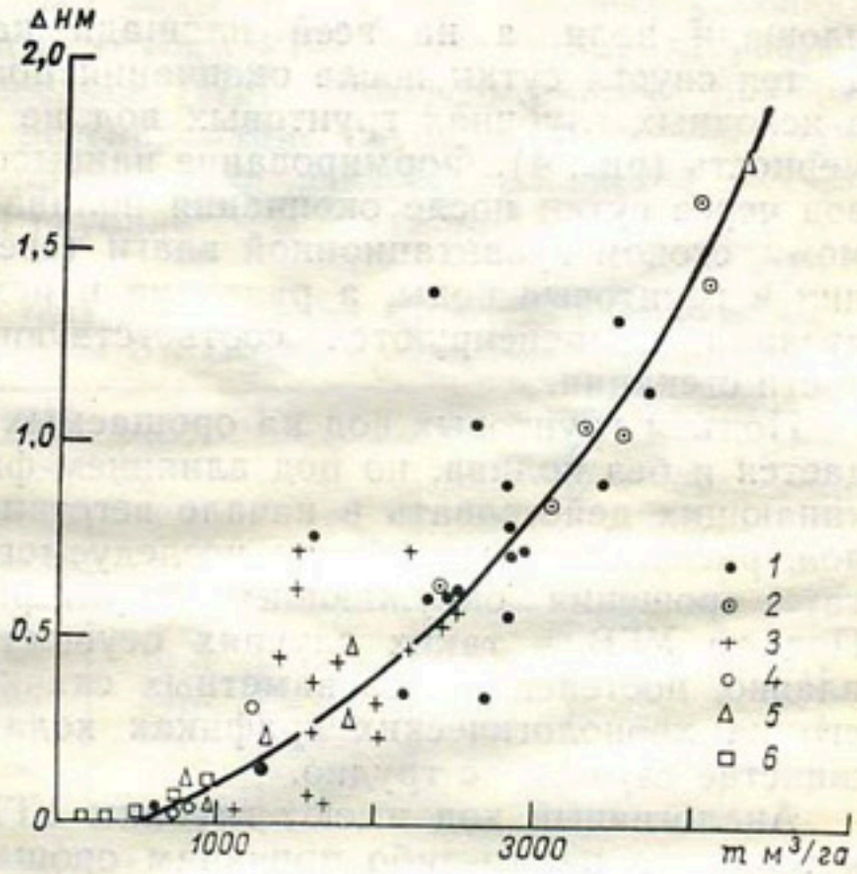


Рис. 3. Зависимость подъема УГВ за полив от размера поливной нормы.

1—4 — бороздковое орошение (усл. обозначения см. рис. 2); *5* — внутрипочвенное; *6* — дождевальное (*5* и *6* — совхоз № 1, Голодная степь).

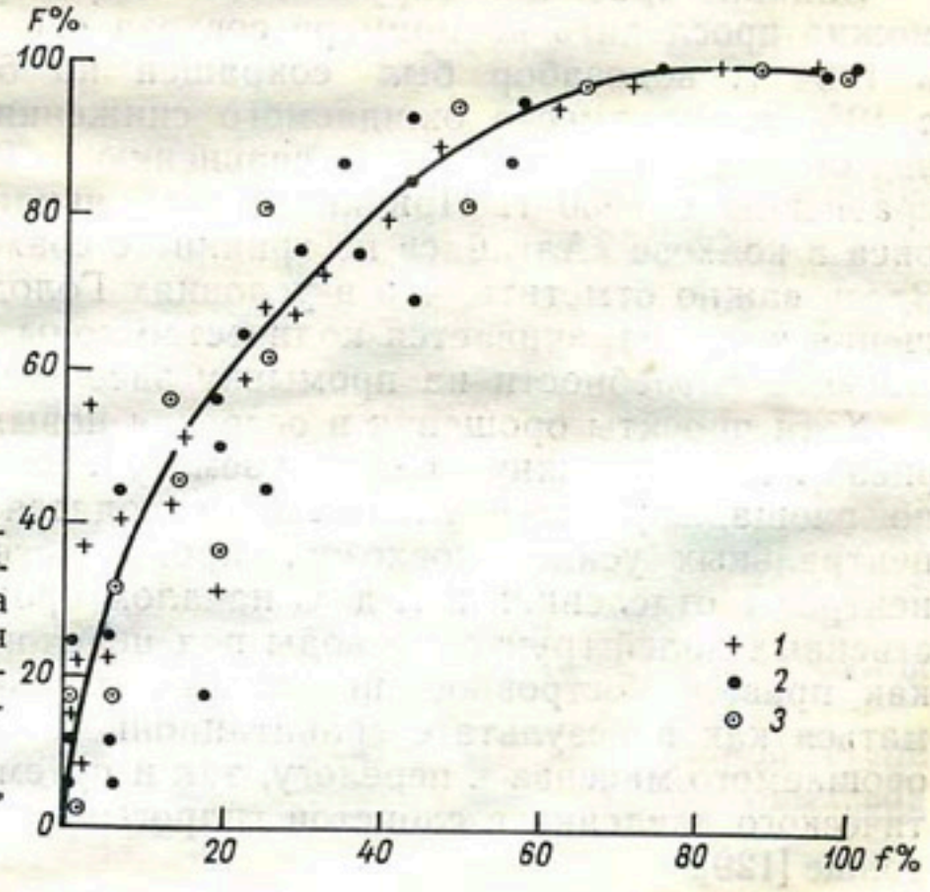


Рис. 4. Связь доли площади F, охваченной поливом, с площадью, на которой сформировался наивысший УГВ за полив (% от общей площади поля).

При глубинах УГВ: 1 м (*1*), 2 м (*2*), 3 м (*3*).

площади поля, а на всей площади наивысший УГВ наблюдается спустя сутки после окончания полива, причем различия в исходных глубинах грунтовых вод не нарушают эту закономерность (рис. 4). Формирование наивысшей отметки грунтовых вод через сутки после окончания полива обусловлено, по-видимому, стоком гравитационной влаги (сверх НВ) из зоны аэрации в грунтовые воды, а различия в исходной мощности зоны аэрации компенсируются соответствующим изменением скорости стекания.

Подъем грунтовых вод на орошаемых полях нередко наблюдается и без полива, но под влиянием фильтрации воды из начинающих действовать в начале вегетационного периода каналов, расположенных вблизи исследуемого поля, или в результате орошения окружающих территорий (соседних полей). Подъем УГВ в таких случаях осуществляется, как правило, плавно, постепенно, без заметных скачков и потому выделить его на хронологических графиках хода глубин УГВ в большинстве случаев не трудно.

Аналогичный ход имеют глубины УГВ и на участках поля, которые по каким-либо причинам орошались незначительными нормами или не орошались вовсе. Примером может служить скважина *А* в совхозе № 18 (см. рис. 1), расположенная на микроповышении, до которого оросительная вода при поливах не поднималась. Как видно, подъем грунтовых вод по этой скважине происходит плавно и прогрессивно в течение всего периода вегетации, а начало снижения УГВ соответствует окончанию сезона поливов.

Влияние орошения окружающих территорий на подъем УГВ можно проследить на примере совхоза «Пахта-Арал» [139], где в 1954 г. водозабор был сокращен на 58% по сравнению с 1950 г., но вместо ожидаемого снижения уровня грунтовых вод он поднялся на 16 см по сравнению с 1953 г. и на 46 см по сравнению с 1950 г. Причиной этого явились поливы посевов риса в колхозе «Алгабас» на границе с совхозом «Пахта-Арал». Здесь важно отметить, что в условиях Голодной степи для орошения риса затрачивается количество воды, в 2—3 раза превышающее потребности на промывку засоленных земель [139].

Хотя проекты орошения и освоения новых земель предусматривают бесперелożную систему землепользования, значительные по площади участки неизбежно отводятся под строительство центральных усадеб совхозов, производственно-хозяйственных центров в отделениях и т. д. С началом орошения сельскохозяйственных полей грунтовые воды под перелогами, занимающими, как правило, островное положение, также начинают подниматься как в результате гравитационного подземного стока от орошаемого массива к перелогу, так и путем передачи гидростатического давления в слоистой гидрогеологически неоднородной толще [129].

Интенсивность перетока воды при прочих равных условиях определяется градиентами глубин УГВ, которые характеризуют дренажный эффект перелога [179]. Опытные данные показывают, что многолетнее регулирование глубины залегания грунтовых вод перелогом практически завершается через 4 года орошения при исходной глубине 7—8 м (табл. 1).

Таблица 1

Изменение глубины УГВ (см) под перелогом $H_п$ и под примыкающим к нему хлопковым полем $H_х$. Голодная степь, совхоз № 18

Год орошения	Начало вегетации				Конец вегетации			
	$H_п$	$H_х$	$H_п - H_х$		$H_п$	$H_х$	$H_п - H_х$	
			см	%			см	%
1	780	700	80	10,3	760	620	140	18,4
2	755	570	185	24,5	700	320	380	54,2
3	600	360	240	40,0	400	320	80	20,1
4	250	150	100	40,0	245	240	5	2,1

В период многолетнего регулирования 20—25% величины сработки грунтовых вод расходуется на переток к перелогу, а после исчерпания потенциальных возможностей перелога (сезонное регулирование) эта величина снижается до 8—12%. Эти данные следует считать приближенными, поскольку плавное изменение УГВ под перелогом затрудняет определение его приращений за конкретные поливы или межполивные интервалы.

2. Питание грунтовых вод атмосферными осадками

В отдельные годы влияние атмосферных осадков проявляется настолько, что отпадает необходимость в проведении влагозарядковых и промывных поливов. Наиболее характерной в этом отношении была зима 1968-69 г., когда установившийся в начале января снежный покров продолжал лежать до середины марта при средней за период температуре воздуха на 7°С ниже нормы. Сумма осадков за январь—март превысила норму в 1,8—2,4 раза, причем снег покрыл почву, дефицит влаги которой был по существу ликвидирован декабрьскими дождями слоем 60—80 мм. Поэтому весеннее снеготаяние привело к повсеместному питанию грунтовых вод даже при глубине их залегания 6 м и более. Например, в совхозе № 18 Голодной степи за период снеготаяния подъем УГВ составил в среднем 70 см при исходной глубине 375 см.

При близком залегании грунтовых вод в Голодной степи к концу снеготаяния имели место случаи выхода грунтовых вод на дневную поверхность [109].

Однако подобное сочетание обстоятельств, благоприятствующих интенсивному питанию грунтовых вод атмосферными осадками, характеризуется крайне редкой обеспеченностью [208] и потому не может иметь принципиального значения применительно к условиям основных объектов орошения и освоения земель в Узбекистане.

Количество осадков, участвующее в питании грунтовых вод, определяют, как правило, с помощью лизиметров. В течение 1950—1954 гг. И. К. Киселева [107] проводила исследования на лизиметрах, характеризующих различные почвенно-растительные комплексы совхоза «Пахта-Арал», и установила, что 41% годовой суммы атмосферных осадков достигает грунтовых вод, залегающих на глубине 1 м на хлопковых полях, 32% на люцернике и 30% на перелогах. Если же грунтовые воды залегают на глубине 2 м, то те же значения соответственно равны 14, 10 и 16%, т. е. в 2—3 раза меньше.

До грунтовых вод, залегающих на глубине 3 м, под хлопковым полем проникает лишь 3% годовой суммы осадков (в 14 раз меньше), под люцерновым полем 0,4% (в 80 раз меньше) и под перелогом 1,2% (в 25 раз меньше). Полученные результаты И. К. Киселева объясняет различной степенью иссушения исследуемых почвенно-растительных комплексов к моменту выпадения осадков, в результате чего оказывается различным начальный слой потерь дождя. При прочих равных условиях величина потерь дождя определяется интенсивностью перехвата осадков растительностью и, следовательно, зависит от фазы ее развития.

В более поздней работе того же автора [109] сделана попытка оценить влияние засоления почвы на питание грунтовых вод атмосферными осадками. Автор исходит из того, что засоленная почва обладает меньшим дефицитом влаги и потому при том же слое дождя большая его часть достигает грунтовых вод. Результаты наблюдений 1965—1966 гг. показали, что в лизиметрах с хлопчатником при исходной степени засоления по хлору 0,039% до глубины 1 м проникло 23,3% осадков, а при исходном содержании хлора в почве 0,068% питание грунтовых вод, залегающих на той же глубине, составило 25,3%. Как видно, существенное увеличение содержания хлора в почве (на 74%) обусловило лишь незначительную разницу в питании грунтовых вод, и поскольку эта разница, по-видимому, целиком лежит в пределах погрешностей лизиметрических измерений, делать выводы относительно влияния исходного засоления зоны аэрации на интенсивность питания грунтовых вод атмосферными осадками преждевременно.

Использование лизиметрического метода, особенно при отсутствии учета динамики влажности монолита, может привести к противоречивым результатам, обобщить которые даже применительно к одному и тому же региону в большинстве случаев

не представляется возможным. Например, Х. Т. Туляганов [233] приводит данные для голодностепского совхоза «Малек», согласно которым при глубине УГВ 1, 2 и 3 м на питание грунтовых вод расходуется соответственно 15, 10 и 7% годовой суммы осадков, а при более глубоком стоянии грунтовых вод осадки вовсе не участвуют в их питании, целиком расходуясь на пополнение запасов влаги зоны аэрации. Для тех же глубин УГВ в Голодной степи, по данным Д. М. Каца [101], питание грунтовых вод равно 34, 14 и 2% годовой суммы осадков соответственно, а по материалам Н. А. Кенесарина [105] в диапазоне глубин УГВ 3,5—4,5 м 8% осадков питают грунтовые воды, а в диапазоне 2—3 м уже 20—25%.

Краткий обзор литературных данных позволяет констатировать наличие единодушного мнения о сокращении роли атмосферных осадков в питании грунтовых вод с ростом глубины их залегания, но взгляды на количественную оценку этого процесса существенно различны.

Известно, что годовая сумма осадков складывается из дождей различной интенсивности, продолжительности и слоя и далеко не каждый дождь обеспечивает сквозное промачивание зоны аэрации даже при малой ее мощности. Но и при неизменных параметрах дождя интенсивность питания грунтовых вод может быть различной в зависимости от предшествующего увлажнения почвы, численно выражаемого ее влажностью или индексами предварительного увлажнения, обзор которых приведен в монографии Ю. Б. Виноградова [48]. Строго говоря, влажность почвы учитывается косвенно глубиной стояния УГВ, но нередко, особенно в весенние месяцы, когда выпадает до половины годовой суммы осадков, интенсивность испарения влаги верхними горизонтами почвы превосходит интенсивность капиллярного подпитывания со стороны грунтовых вод и поэтому в бездождные периоды имеет место дефицит почвенной влаги, пропорциональный продолжительности бездождных интервалов и испаряемости. Следовательно, осадки невегетационного периода, выпадающие малыми суммами, целиком аккумулируются в зоне аэрации, причем глубина промачивания тем меньше, чем меньше слой осадков и чем больше продолжительность бездождного интервала.

Из материалов наблюдений за атмосферными осадками и глубиной УГВ на опытных участках в Голодной и Каршинской степях (в основном средние суглинки) выбирались такие суммы осадков за отдельный дождь, которые обеспечивали некоторое приращение запасов грунтовых вод, не объяснимое другими причинами (подток, зимний полив и т. д.). Одновременно фиксировалась продолжительность бездождных интервалов, косвенно характеризующих дефицит влажности верхних горизонтов зоны аэрации. Прямая характеристика оказалась невозможной

из-за редких измерений влажности почв в невегетационный период.

Как выяснилось, осадки слоем $x \leqslant 5$ мм ни в одном из 147 случаев не приводили к изменению глубины УГВ в наблюденном диапазоне его залегания от 1 до 5 м. Следовательно, с точки зрения питания грунтовых вод они могут рассматриваться как неэффективные. Если приращение глубины УГВ, обусловленное выпадением дождя, обозначить ΔH_x, то величина $\mu \Delta H_{x\uparrow}$, отнесенная к слою осадков за дождь, будет численно

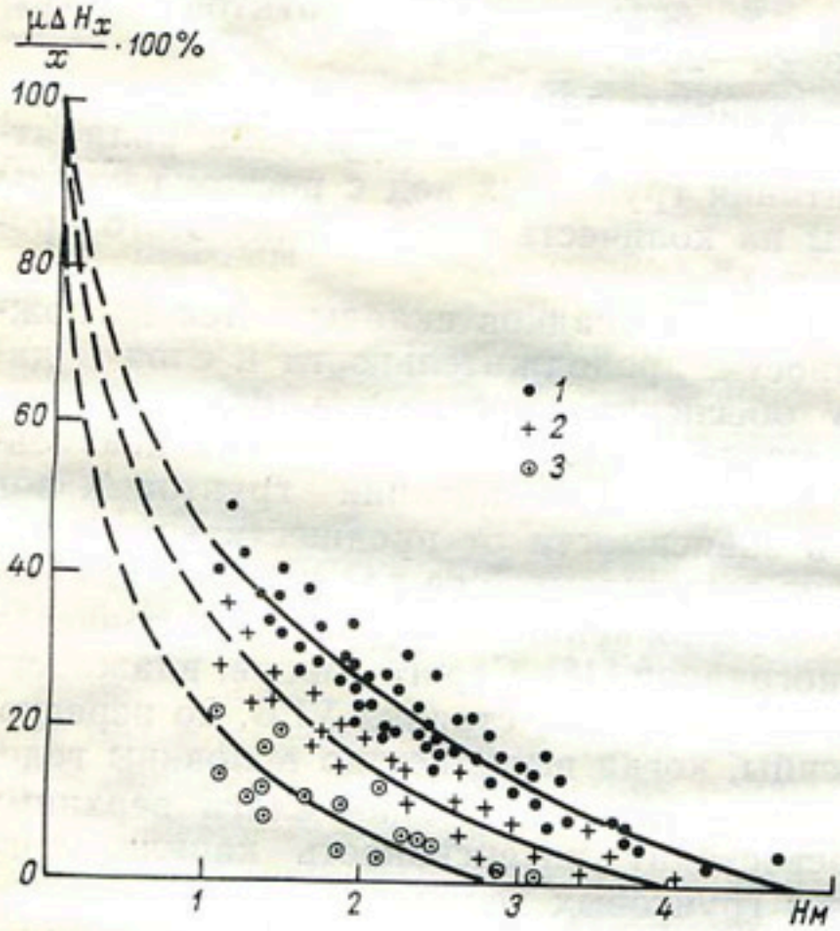


Рис. 5. Зависимость доли питания грунтовых вод за дождь слоем $x > 5$ мм от глубины УГВ.

1 — бездождный интервал 1—4 сут., *2* — то же 5—10 сут., *3* — то же свыше 10 сут.

равна доле атмосферных осадков, просочившихся до грунтовых вод и обусловивших изменение их запаса. Согласно рис. 5, эта величина зависит от глубины залегания грунтовых вод (мощности зоны аэрации) и продолжительности бездождных интервалов.

Ю. Б. Виноградов [48] показал, что обеспеченность бездождных интервалов обратно пропорциональна их продолжительности. Имеющиеся материалы наблюдений на опытных участках подтверждают этот вывод. Так, бездождный интервал 1—4 суток характеризуется 73%-ной обеспеченностью, 5—10 суток — 31%-ной, а свыше 10 суток — лишь 8%-ной. Поэтому при расчетах питания грунтовых вод атмосферными осадками предпочтение следует отдать верхней кривой на рис. 5.

Расчет ведется на основании информации метеорологических станций и зависимости на рис. 5. Например, по станции Таш-

кент годовая норма осадков составляет 437 мм, а общее число дней с осадками 83,1, из которых в течение 26,7 дня выпадали осадки слоем $x>5$ мм, годовая сумма которых оказалась равной 346 мм. При глубине УГВ, допустим, 1 м питание грунтовых вод составляет, согласно рис. 5 (верхняя кривая), 45% атмосферных осадков, слагающихся из дождей слоем $x>5$ мм, т. е. от 346 мм. Эта величина равна 151 мм, а в долях от общей годовой суммы осадков, слагающихся из всех дождей, составляет лишь 35,8%. Аналогичным образом подсчитано питание грунтовых вод атмосферными осадками для других станций и диапазона глубин УГВ 1—4 м (табл. 2).

Таблица 2

Питание грунтовых вод атмосферными осадками (% от их годовой суммы)

Станция	Число дней с осадками		Годовая сумма осадков		Питание грунтовых вод при их глубине (м)			
	всего	при $x>5$ мм	всего	при $x>5$ мм	1	2	3	4
Ташкент	83,1	26,7	437	346	35,8	21,4	11,1	4,0
Сырдарья	62,0	18,3	305	213	31,6	18,9	9,8	3,5
Карши	55,4	16,5	267	196	33,1	20,1	10,3	3,7
Шерабад	46,9	12,6	194	124	28,8	17,3	8,9	3,2
Среднее					32,4	19,4	10,0	3,6

Таким образом, при глубине УГВ 1, 2, 3 и 4 м питание грунтовых вод составляет в среднем соответственно 32, 19, 10 и 4% годовой суммы осадков, а при глубине, превышающей 4,5 м, атмосферные осадки, по-видимому, не принимают участия в питании грунтовых вод под сельскохозяйственными полями.

Изложенный способ оценки питания грунтовых вод осадками не может быть использован применительно к перелогу, поскольку приращение глубины УГВ под перелогом формируется, как правило, в результате одновременного воздействия осадков и грунтового перетока от полей, где грунтовые воды залегают на меньшей глубине. Известно, однако, что при прочих равных условиях инфильтрация на пахотных участках в среднем на 12% превышает соответствующую величину в степи [52], в связи с чем можно предполагать, что интенсивность питания грунтовых вод осадками на перелоге ниже на величину, близкую к указанной.

Данные табл. 2 получены из расчета отсутствия питания грунтовых вод при дождях слоем $x\leqslant 5$ мм, что следует из натурных наблюдений, подавляющее количество которых (87%) относится к невегетационному периоду. Между тем в литературе имеются указания на отдельные факты подъема УГВ при самых незначительных осадках. Х. Л. Пенман [172] считает подобные

факты следствием того, что растения прекращают расход грунтовой воды на период испарения перехваченной ими части атмосферных осадков. Аналогичную точку зрения высказывают Р. Слейтер и М. Макилрой [225]. В принципе создание подобных условий, благоприятствующих питанию грунтовых вод при малых осадках, возможно при близком стоянии УГВ и лишь в активные фазы развития растений. Но в основных зонах развития хлопководства осадки в этот период практически отсутствуют.

3. Расход грунтовых вод в зону аэрации

Величина расхода грунтовых вод в зону аэрации является частью общей сработки УГВ в течение межполивного интервала. Скорость последней определяется глубиной стояния УГВ, высотой капиллярного поднятия, зависящей от физических свойств грунта, испаряемостью, фазой развития растительности, а также эффективностью дренажа.

В институте Средазгипроводхлопок для расчета сработки УГВ широко используется уравнение С. Ф. Аверьянова [5, 6], которое в интерпретации Ф. В. Серебренникова [219] имеет вид

$$h_2 = \frac{1}{b}\left[(a + bh_1)\exp\left(-\frac{tb}{10\,000\mu}\right) - a\right], \qquad (3)$$

где h_2 — глубина УГВ через интервал времени t по сравнению с начальной h_1; a и b — коэффициенты, учитывающие испарение и водопонижающее действие дренажа.

В уравнении (3) учет части грунтовых вод, обусловленный их расходом в зону аэрации, основан на уравнении С. Ф. Аверьянова [5]

$$E_x = E_0(1 - x/H_0)^n, \qquad (4)$$

где E_x — расход грунтовых вод при их глубине x; E_0 — испаряемость или испарение с открытой водной поверхности; H_0 и n — параметры, величина которых для условий Голодной степи равна 8 и 2 соответственно [161].

На основе анализа результатов многолетних лизиметрических наблюдений на орошаемых землях Ростовской области и Северного Кавказа С. И. Харченко [246] установил, что расход грунтовых вод в зону аэрации определяется их глубиной, ходом метеорологических элементов приземного слоя воздуха и фазами развития растений. Расчетная формула имеет вид

$$K_h = E_0/e^{mH}, \qquad (5)$$

где K_h — интенсивность расхода грунтовых вод в зону аэрации, E_0 — испаряемость, e — основание натуральных логарифмов,

m — параметр, отражающий характер почвогрунтов и фазу развития растительности, H — глубина залегания УГВ. Для районов, где распространены близкие по механическому составу суглинки, параметр $m=1{,}4$ при экстремальных фазах развития растений, а для фаз наиболее активного их развития $m=0{,}78$.

Формула (5) рекомендуется для расчета подпитывания корнеобитаемого слоя почвы грунтовыми водами на полях, занятых различными сельскохозяйственными культурами в неорошаемых и орошаемых районах зоны недостаточного увлажнения при залегании УГВ в диапазоне от 0,1 до 5—6 м от поверхности почвы. При этом погрешность расчета среднесуточных (за декаду) значений K_h в 80% случаев не выходит за пределы 12—14%.

В публикациях, основанных на данных наблюдений по лизиметрам без взвешивания, неправомерно ставится знак равенства между расходом грунтовых вод в зону аэрации и суммарным испарением. Отсутствие учета динамики влагозапаса монолита, равно как и различия в параметрах лизиметров, приводит к значительным расхождениям натурных данных, в результате чего проектировщики попадают в затруднительное положение при объективной их оценке. Например, Н. Н. Ходжибаев и М. С. Алимов [247] приводят для Голодной степи данные, согласно которым при глубине УГВ 1,5 м за вегетационный период испаряется 366 мм из запасов грунтовых вод, а при глубине 2 м лишь 342 мм. Если же воспользоваться расчетными зависимостями Д. М. Каца [102], то расходы грунтовых вод для тех же глубин окажутся равными 300 и 200 мм соответственно, а в Вахшской долине Таджикистана, где испаряемость выше, лишь 277 и 170 мм [176].

Из уравнения водного баланса зоны аэрации следует, что в межполивные интервалы и при отсутствии бокового притока и оттока грунтовых вод

$$\mu \Delta H_{\downarrow} = E - \Delta W + q, \qquad (6)$$

т. е. в рассматриваемых условиях сработка глубины УГВ зависит от испарения, изменения запасов влаги в зоне аэрации и дренажа. При неизменных влагозапасах можно написать

$$I = \frac{\mu \Delta H_{\downarrow} - q}{E}, \qquad (7)$$

где I — доля грунтовых вод в суммарном испарении. По данным К. Г. Ганиева [56], обобщившего материалы лизиметрических исследований за 20 лет, величина I при глубине УГВ 1 м колеблется по территории от 0,51 (низовья Амударьи) до 0,74 (Сурхандарья), составляя для Голодной степи 0,65. Для Каршинской степи при той же глубине УГВ $I=0{,}59 \div 0{,}64$ для хлопчатника и 0,53—0,63 для люцерны [141].

Помимо указанных причин, сработка глубины УГВ происходит и под действием силы тяжести — спад, который А. Г. Владимиров [50] называет гидравлическим. Этот фактор не может быть учтен при наблюдениях в лизиметрах, но включается в величины ΔH, зафиксированные в естественных условиях, применительно к которым $\mu\Delta H_t$ за вычетом дренажного стока приравнивается к расходу грунтовых вод в зону аэрации. Для количественной его оценки необходимо определить параметр водоотдачи μ, который А. А. Роде [204] называет характеристикой, определяющей способность почвы отдавать гравитационную влагу путем стекания, а С. Ф. Аверьянов предлагает рассматривать μ как количество воды, которое может вместиться в зоне аэрации.

Существует значительное число методов определения водоотдачи (водовместимости) грунта; обстоятельная сводка их приведена в работах А. В. Лебедева [135], И. Б. Вольфцуна [53], Н. И. Капотовой [99] и других.

Чаще всего используется метод, основанный на анализе режима влажности грунта в зоне залегания грунтовых вод при наличии известного диапазона колебаний последних. Если водоотдачу грунта приравнять к количеству гравитационной воды в почве, то можно написать

$$\mu = W_{\text{пв}} - W_{\text{нв}}, \tag{8}$$

где $W_{\text{пв}}$ и $W_{\text{нв}}$ — запасы влаги в слое колебания УГВ, соответствующие полной и наименьшей влагоемкости. Разность $W_{\text{пв}} - W_{\text{нв}}$ представляет собой максимальное количество гравитационной воды в почве, и потому величина μ, определенная по уравнению (8), будет иметь наибольшее значение, совпадающее с фактическим лишь в том случае, когда грунтовые воды и капиллярная кайма полностью покидают расчетный слой грунта, влажность которого понижается до НВ. Для грунтов тяжелого механического состава величина μ может быть еще больше, если рассматривать водоотдачу как разность между полной и максимальной молекулярной влагоемкостью (ММВ) грунта, но для песчаных грунтов этот эффект невелик в силу близости НВ и ММВ.

В условиях орошения при близком залегании УГВ расчетный слой почвы находится, как правило, в пределах капиллярной каймы, а его влажность равна капиллярной влагоемкости (КВ), т. е. выше НВ. Следовательно, μ определится как разность $W_{\text{пв}} - W_{\text{кв}}$, но поскольку КВ прогрессивно возрастает с приближением расчетного слоя к зеркалу грунтовых вод, то текущая водоотдача зависит от глубины УГВ [5]

$$\mu_y = \omega_1 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y}{H_{\text{к}}}\left[1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^2\right]}\right). \tag{9}$$

При отсутствии скоплений защемленного воздуха ПВ численно равна общей пористости $П$, определяемой по формуле

$$П = 100(1 - \gamma/d)\,\%,$$

где γ и d — объемный и удельный вес грунта соответственно. Однако в условиях интенсивной динамики УГВ и водоподачи защемленный воздух присутствует практически всегда, и потому ПВ$<П$ на 10—30% в суглинках и на 5—15% в супесях [204].

Величину НВ чаще всего определяют методом залива площадок с последующим отбором проб почвы на влажность. Но при близком залегании УГВ, когда имеет место подпор со стороны капиллярной каймы грунтовых вод, этот метод дает закономерно завышенные результаты, соответствующие, очевидно, КВ. Например, В. Б. Гуссак и С. Н. Рыжов [66] приводят данные, согласно которым при глубине УГВ 160 см $W_{НВ}=26{,}6\%$ (слой почвы 0—100 см), а при глубине 300 см в том же слое почв $W_{НВ}=22{,}3\%$.

При близком залегании грунтовых вод представляется целесообразным использовать для определения НВ метод В. Е. Кабаева [94], получивший значительное распространение в Узбекистане.

Для оценки возможной вариации НВ по площади приведем ряд ее значений, определенных методом Кабаева в 9 точках, равномерно распределенных по площади 2 га (Бешкентский опытный участок в Каршинской степи, средние суглинки, слой почвы 0—100 см):

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
$W_{НВ}$% об.	28,6	26,1	27,4	26,9	25,1	26,3	27,3	27,3	27,6	27,0

Приведенный ряд статистически однороден, не содержит промахов, а колебания НВ в общем следуют за изменением количества физической глины в почве [186].

Для пояса орошаемых сероземов запасы влаги, соответствующие НВ, в метровом слое почвы принято считать [212] равными для легких грунтов 220 мм, для средних 280 и для тяжелых 350 мм.

Параметр водоотдачи, вычисленный по уравнению (8), представляет собой почвенно-гидрологическую константу так же, как и элементы этого уравнения. Коэффициент корреляции линейной связи $\mu=\psi(f)$, где f — содержание физической глины в почве, равен $0{,}86\pm0{,}04$, а расчетное уравнение, имеющее вид [186]

$$\mu = 0{,}362 - 0{,}005f,$$

справедливо в диапазоне $10<f<70\%$.

Поскольку водоотдача водоносных пород является функцией их влажности в зоне колебания УГВ, параметр μ объективно

определяется по разности фактических влагозапасов до и после снижения грунтовых вод [136], причем эффективность этого метода особенно заметна при использовании нейтронометрии влажности почв, при которой исключаются как трудности отбора проб грунта, максимально насыщенного водой, так и погрешности, связанные с вариацией влажности и глубины УГВ по площади.

Текущую водоотдачу при конкретном режиме УГВ рассчитывают по формуле (9), в которой ордината y отсчитывается

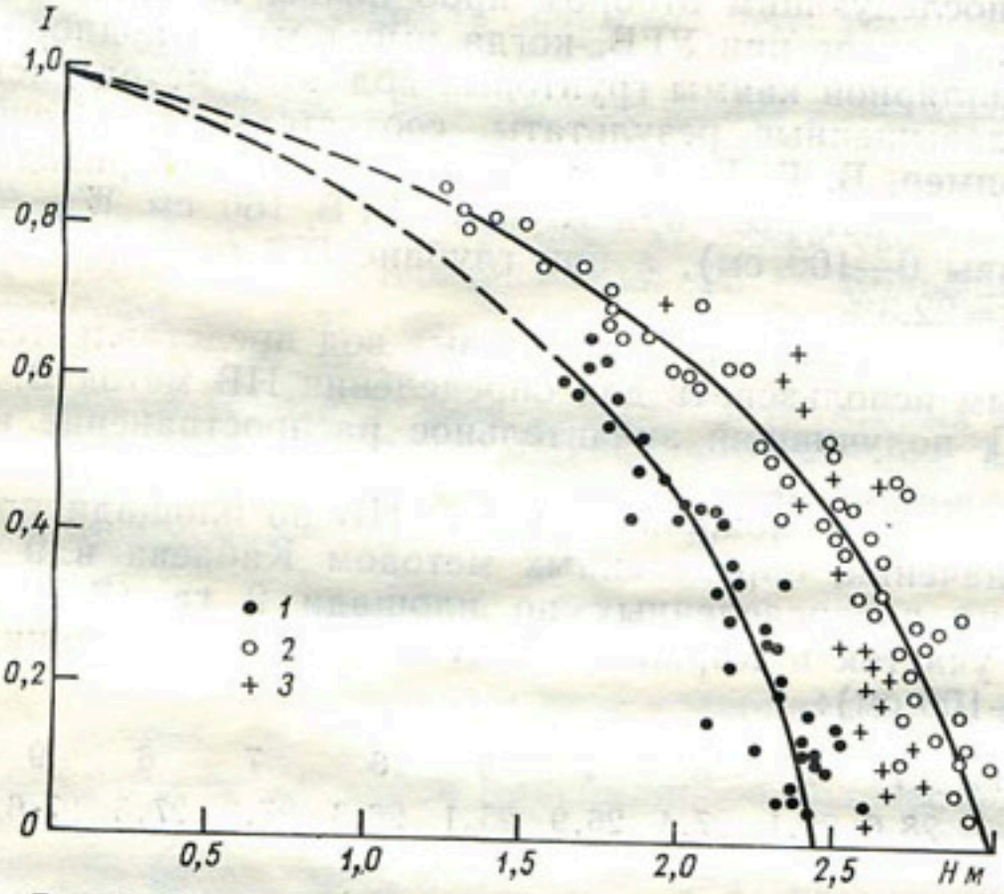


Рис. 6. Зависимость доли грунтовых вод в суммарном испарении с хлопкового поля от глубины залегания УГВ.

1 — начальные и конечные фазы развития хлопчатника, *2* — фазы наиболее активного его развития, *3* — перелог.

от зеркала грунтовых вод. При $y=0$ $\mu_y=0$, а при $y=H_к$ результаты вычислений по формулам (8) и (9) совпадают.

Располагая информацией о водоотдаче грунтов, динамике глубины УГВ и суммарного испарения, определим величину I, которая зависит от положения грунтовых вод и фазы развития хлопчатника (рис. 6). Зависимость на рис. 6, соответствующая естественным условиям произрастания хлопчатника и отличающаяся от приведенных в литературе аналогичных связей [53, 246], подчиняется уравнению

$$\mu \Delta H_{\downarrow} = E\left(a \sqrt{b-(H+c)^2}-d\right), \qquad (10)$$

где E — суммарное испарение (мм), H — глубина УГВ (м), a, b, c, d — численные коэффициенты, равные для начальных и конечных фаз развития хлопчатника соответственно 0,4; 9,92; 0,6

и 0,25, а для наиболее активных фаз вегетации 0,4; 11,90; 0,3 и 0,37.

В случае необходимости вместо E может быть использована информация об испаряемости E_0. Тогда значения численных коэффициентов составят: $a=0{,}3$ (весь период вегетации), $d=0{,}17$ (начальные и конечные фазы) и 0,28 (наиболее активные фазы вегетации хлопчатника).

Область применения уравнения (10) ограничена грунтами суглинистого механического состава в пределах Каршинской и Голодной степей, т. е. условиями, которым соответствуют фактические данные, положенные в основу обобщения. Между тем влияние литологического строения грунта настолько велико, что в отдельных случаях расход грунтовых вод в зону аэрации позволяет получать урожай хлопчатника до 36 ц/га при одном поливе или вовсе без поливов [109]. Но в тяжелых, плотных и слоистых грунтах капиллярное подпитывание происходит медленно, переносимые объемы воды незначительны и потому грунтовые воды не играют существенной роли в питании растений даже при залегании на глубине 1,5—2,0 м [29].

Фактические данные, приведенные на рис. 6, соответствуют оптимальной концентрации грунтовых вод, равной в период вегетации 3—6 г/л. Если же концентрация грунтовых вод превышает 12 г/л, растения угнетаются и мало используют грунтовые воды независимо от глубины их залегания, а рост вязкости грунтовых вод сокращает их расход в зону аэрации при самых благоприятных условиях [113].

И. Б. Вольфцун [53] предлагает использовать зависимость, аналогичную (10), для определения параметров n, H_0 в формуле (4), исходя из того, что H_0 соответствует глубине залегания УГВ, при которой $\mu\Delta H/E_0=0$, а параметр n численно равен тангенсу угла зависимости $\mu\Delta H/E_0=f(1-x/H_0)$ с осью ординат. Определенные таким образом значения n, H_0 для условий Голодной и Каршинской степей равны: для начальных и конечных фаз развития хлопчатника $n=0{,}7$ и $H_0=2{,}5$ м, а для высоких фаз $n=0{,}9$ и $H_0=3{,}0$ м. Полученные значения существенно ниже опубликованных в литературе [161].

Статистическая проверка уравнения (10) показала, что в 85% случаев погрешность расчета декадных сумм расхода грунтовых вод в зону аэрации не превышает 15% определяемой величины. Сказанное в равной степени относится к формуле (4) применительно к вычисленным значениям входящих в нее параметров.

С. И. Харченко [246], подчеркивая влияние фаз развития растений, отмечает, что на стерне грунтовые воды расходуются в зону аэрации только при залегании их не глубже 1 м, в редких случаях 1,5 м, но при наличии растительного покрова заметное обогащение водой зоны аэрации имеет место и при глубине УГВ до 3 м.

С этой точки зрения представляет интерес оценить динамику $\mu\Delta H$ на перелоге, покрытом редкой растительностью пустынного типа. Но поскольку сработка грунтовых вод под перелогом частично компенсируется подтоком со стороны примыкающего орошаемого поля, установить зависимость $I=f(H)$ на перелоге затруднительно (рис. 6).

Из сравнения средних месячных расходов грунтовых вод в зону аэрации, вычисленных различными методами (табл. 3), следует, что в целом за период вегетации хлопчатника среднее рассогласование результатов, полученных по формулам (5) и (10), составляет около 15%, а по формулам (4) и (10) около 11%, но для отдельных месяцев расхождения результатов весьма велики.

Таблица 3

Средние месячные расходы грунтовых вод в зону аэрации (мм), вычисленные тремя методами при наблюденной динамике глубины УГВ и испаряемости. Голодная степь, совхоз № 1, 1970—1974 гг.

Метод	V	VI	VII	VIII	IX	X	Итого за вегетацию
$\mu\Delta H_{\downarrow}$	0	20,9	58,2	80,9	38,0	0,5	198
K_h	4,8	33,3	40,6	36,7	11,1	2,2	136
E_x	0	19,4	60,1	65,4	31,7	7,9	184

Вероятно, одной из причин подобных расхождений в отдельные месяцы вегетационного периода является использование дифференцированного по декадам от посева параметра m в формуле (5) в соответствии с рекомендациями ГГИ [236], основанными на обобщенных результатах наблюдений на орошаемых землях Ростовской области и Северного Кавказа. Хотя даты посева, продолжительность вегетации и сроки наступления основных фаз развития хлопчатника отличны от зерновых культур юга Европейской части СССР, согласование результатов, полученных по формулам (5) и (10), можно считать удовлетворительным для периода вегетации в целом.

4. Пространственная изменчивость глубины залегания уровня грунтовых вод

При прочих равных условиях глубина УГВ на конкретной площади зависит от режима и техники орошения, коэффициента полезного действия оросительной системы, коэффициента земельного использования, степени однородности литологического строения грунта с точки зрения его водопроницаемости и водо-

отдачи как в зоне аэрации, так и в зоне насыщения, эффективности дренажа, а также совокупности условий, определяющих интенсивность расхода грунтовых вод в зону аэрации.

При картировании глубин УГВ на больших территориях обычно используют установленные в процессе геологических и гидрогеологических исследований закономерности движения грунтовых вод и литологического сложения грунтов. Применительно же к малым орошаемым площадям глубина УГВ на конкретную дату периода вегетации в основном определяется совокупностью факторов, характеризующих питание грунтовых вод и их расход в зону аэрации. Сама неравномерность водоподачи по площади и во времени и при прочих равных условиях неизбежно влечет за собой неравномерность залегания УГВ, поскольку на орошаемых полях нередко соседствуют между собой участки, насыщенные водой до полной влагоемкости (условия интенсивного питания грунтовых вод) и иссушенные до влажности разрыва капиллярной связи (условия интенсивного расхода грунтовых вод в зону аэрации).

При орошении поверхностными методами полива, когда на почву поступает большое количество воды за короткий интервал времени, микрорельеф, сохраняющийся и после планировки земель, увеличивает пестроту распределения глубин УГВ даже в границах уже политой площади. В процессе обработки почв положительные и отрицательные формы микрорельефа могут изменять свое местоположение, но все же влияние микрорельефа на интенсивность питания грунтовых вод сохраняется.

Анализируя результаты наблюдений в совхозе «Пахта-Арал», А. Н. Розанов [207] отмечает, что грунтовые воды под микроповышениями во все сроки наблюдений стоят на 5—45 см глубже, чем на участках с ровной поверхностью, и объясняет этот факт недостаточным поливом повышенных участков.

В. А. Ковда [111], сопоставляя глубины УГВ под хлопчатником в чашевидных низинах и на повышениях, обнаружил, что амплитуда максимальных и минимальных уровней на повышениях значительно меньше, чем в низинах (40—60 см против 100—150 см).

Анализ имеющегося материала натурных ежедневных наблюдений по сгущенной сети скважин позволяет заключить, что среднее абсолютное превышение глубин УГВ на участках с положительными формами микрорельефа над соответствующими величинами на микропонижениях прогрессивно возрастает от 25 до 94 см с понижением средней по площади глубины залегания грунтовых вод от 1 до 4 м, а относительное превышение составляет около 20% (табл. 4).

В число прочих причин, определяющих пространственную изменчивость глубины УГВ, В. А. Ковда [111] включает и состояние культуры хлопчатника. Согласно данным этого автора, под

Таблица 4

Сравнение глубин УГВ (см) под положительными H_1 и отрицательными H_2 формами микрорельефа (среднее за период вегетации)

Средняя по полю глубина УГВ	H_1	H_2	$H_1 - H_2$	$\frac{H_1 - H_2}{H_1}$
100	115	91	24	0,21
200	229	186	43	0,19
300	334	270	64	0,19
400	450	356	94	0,21

хлопчатником хорошего состояния уровень грунтовых вод за период от начала вегетации до первого полива опускается на 10—30 см, а после полива поднимается на 20—50 см, достигая весенней отметки или превышая ее. В то же время под угнетенным и изреженным хлопчатником грунтовые воды залегают на 20—40 см глубже весь вегетационный период. И в этом случае, по-видимому, должно проявляться влияние исходной глубины УГВ. Но на участках с глубиной УГВ 1—2 м выявить влияние густоты и состояния хлопчатника не удалось, а на участках с более глубоким залеганием УГВ изреженный и угнетенный хлопчатник, как правило, приурочен к положительным формам микрорельефа, так что расхождения в глубинах УГВ, помещенные в табл. 4, по-видимому, обусловлены не только микрорельефом, но и состоянием хлопчатника.

Влияние факторов, в той или иной степени определяющих пространственную неравномерность залегания УГВ, сказывается по-разному в период вегетации, когда основную роль играют вегетационные поливы, и в невегетационный период, когда при отсутствии промывных и влагозарядковых поливов пестрота глубины УГВ является следствием пространственной изменчивости литологического сложения грунтов и их водно-физических свойств.

Обычно при оценке приращений запасов грунтовых вод на исследуемой площади оперируют глубинами УГВ, определенными по картам гидроизогипс, или средними арифметическими величинами. Однако сам факт значительной пространственной изменчивости глубин УГВ, постоянно наблюдаемый в природе, во многих случаях ограничивает условия использования средних арифметических значений на различных орошаемых площадях.

В качестве меры изменчивости глубины залегания грунтовых вод под орошаемым полем можно принять среднее квадратическое отклонение $\sigma(H)$ и коэффициент вариации $C_v(H)$, характеризующий степень отклонения глубин УГВ в некоторой конкретной точке орошаемого поля от средней арифметической глубины применительно ко всей площади.

Согласно данным табл. 5, полученным на основании многолетних ежедневных наблюдений на сгущенной сети скважин, вегетационные поливы хлопчатника на 60—100% повышают степень изменчивости глубины УГВ по площади независимо от способа орошения и исходной глубины залегания грунтовых вод.

Таблица 5

Среднее значение параметров изменчивости глубины УГВ в период вегетации хлопчатника и невегетационный период

Способ орошения	Исходная глубина УГВ (м)	Период вегетации						Невегетационный период	
		до полива		после полива		прибавка за полив (% от исходного значения)		$\sigma(H)$	$C_v(H)$
		$\sigma(H)$	$C_v(H)$	$\sigma(H)$	$C_v(H)$	$\sigma(H)$	$C_v(H)$		
По бороздам	1—2	28	0,19	46	0,31	63	63	33	0,22
	2—3	28	0,11	55	0,22	97	100	28	0,11
	3—4	56	0,16	91	0,26	62	62	42	0,12
	4—5	72	0,16	140	0,31	93	93	27	0,06
Дождевание	3—4	28	0,08	46	0,13	64	63		
ВПО	2—3	18	0,07	40	0,16	67	129		

И все же, при прочих равных условиях, дождевание и внутрипочвенное орошение обеспечивают бóльшую стабильность глубины УГВ по площади, чем поверхностный способ полива по бороздам, и потому при этих способах орошения можно ожидать, что погрешность определения средних величин будет меньше. Например, по данным 20 скважин относительная погрешность при вероятности 0,9 и тех же исходных глубинах УГВ составляет при бороздковом орошении 62,6%, при дождевании 31,4% и при внутрипочвенном орошении 28,0%.

Приращение изменчивости глубин УГВ по площади орошаемого поля под влиянием вегетационных поливов является следствием скорости водоподачи, что видно из рис. 7, данные которого соответствуют бороздковому способу полива. При малой интенсивности водоподачи на поле (100—150 м³/га·сут.) образовавшиеся на отдельных участках бугры грунтовых вод успевают растечься и такой полив практически не увеличивает пространственную изменчивость глубин УГВ, но дальнейший рост скорости водоподачи быстро увеличивает пестроту залегания УГВ.

Оценивая повторяемость различных глубин УГВ под орошаемым полем и допуская 10%-ное отклонение от средних глубин, легко определить, что при бороздковом орошении этому

условию удовлетворяет лишь 70% площади до полива и 50% после полива. При дождевании и внутрипочвенном орошении те же величины равны соответственно 74 и 52, 92 и 33%.

Имеющиеся данные применительно к интервалу глубин УГВ 2—4 м при бороздковом орошении хлопчатника позволяют оценить пространственную изменчивость глубин залегания грунтовых вод под орошаемым полем, а также решить некоторые практические задачи с помощью аппарата корреляционных функций. Полученные ряды наблюдений (до 500 членов) не представляют собой генеральной совокупности, а являются некоторой выборкой из нее, вследствие чего непосредственно по

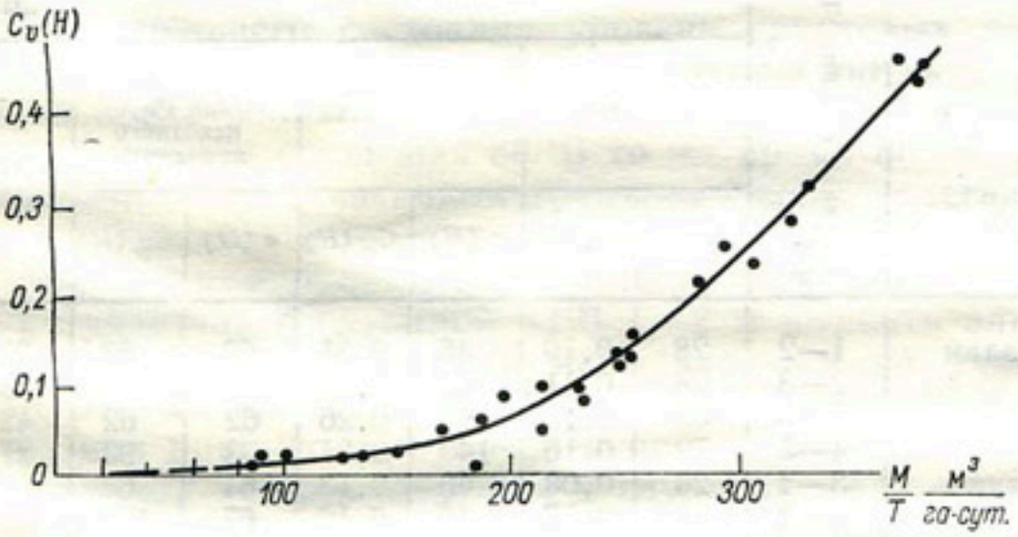


Рис. 7. Влияние скорости водоподачи на приращение $C_v(H)$ за полив.

этим рядам судить о принадлежности к определенной генеральной совокупности невозможно.

Для оценки статистической однородности ряда наблюдений использован критерий согласия χ^2, важным преимуществом которого является то, что он может применяться к эмпирическим данным с любым законом распределения [206]. Подсчет критерия χ^2 производился по формуле [226]

$$\chi^2 = n_1 n_2 \sum_{i=1}^{l} \frac{1}{m_i' + m_i''} \left(\frac{m_i'}{n_1} - \frac{m_i''}{n_2} \right), \qquad (11)$$

где n_1 и n_2 — две независимые выборки объемов, расположенных в l группах с численностями m, а исходными данными служили ряды наблюдений по 7 парам скважин, различно расположенных относительно лоткового и временного оросителей, дрены и элементов микрорельефа. Поскольку значения критерия χ^2 по таблице распределения при вероятности $P(\chi^2) = 0{,}05$ во всех случаях оказались ниже фактического в среднем на 10% (12,6 против 13,9), использовано преобразование $H = H_i/H_{ср}$, при котором коррелировались нормированные значения глубин УГВ.

Практическое использование аппарата корреляционных функций предусматривает наличие известного диапазона расстояний между скважинами, в которых глубина УГВ фиксируется синхронно и систематически. Размеры опытных участков в Голодной степи, данные которых используются при расчетах, а также геометрия расположения скважин позволяют определить корреляционные функции до расстояния 400—500 м. Это расстояние разбивалось на интервалы, в пределах которых осреднялись полученные коэффициенты корреляции, среднее значение которых соответствовало среднему расстоянию в заданном интервале (табл. 6).

Таблица 6

Интервал осреднения и число определенных коэффициентов корреляции нормированных значений глубины УГВ

Интервал осреднения (м)	Среднее расстояние (м)	Число осредненных коэффициентов корреляции	Интервал осреднения (м)	Среднее расстояние (м)	Число осредненных коэффициентов корреляции
0—50	25	19	251—300	275	102
51—100	75	123	301—350	325	118
101—150	125	94	351—400	375	64
151—200	175	129	401—450	425	19
200—250	225	108			

В рассматриваемом случае конкретным выражением корреляционной функции является график изменения коэффициента корреляции нормированных значений глубины УГВ в один и тот же момент времени, но при различном расстоянии между скважинами (рис. 8). Как видно, статистическая структура поля глубин УГВ в выбранные интервалы времени существенно неодинакова, причем в первую очередь обращает на себя внимание различная интенсивность убывания корреляционных функций с расстоянием. Если радиус корреляции l_0, т. е. расстояние, на котором ордината корреляционной функции убывает в e раз, после полива хлопчатника составляет всего 590 м, то в межполивной интервал он поднимается до 1060 м, а в невегетационный период до 1500 м. Из этого, в частности, следует, что в рассматриваемые интервалы времени требуется различное количество наблюдательных скважин для оценки (при прочих равных условиях) средней глубины залегания грунтовых вод на заданной площади и с той же равнообеспеченной погрешностью.

Полученные корреляционные функции (рис. 8) аппроксимируются аналитической формулой вида

$$r(l) = r(0) - al, \qquad (12)$$

где $r(l)$ — коэффициент корреляции при расстоянии l между скважинами, $r(0)$ — значение эмпирической корреляционной

функции при $l \approx 0$, определяющееся методом экстраполяции, a — структурный параметр.

Существенные различия параметров корреляционных функций (табл. 7) применительно к принятым интервалам времени, по-видимому, есть следствие воздействия совокупности факторов, по-разному определяющих в эти интервалы пестроту распределения глубин УГВ под орошаемым хлопковым полем.

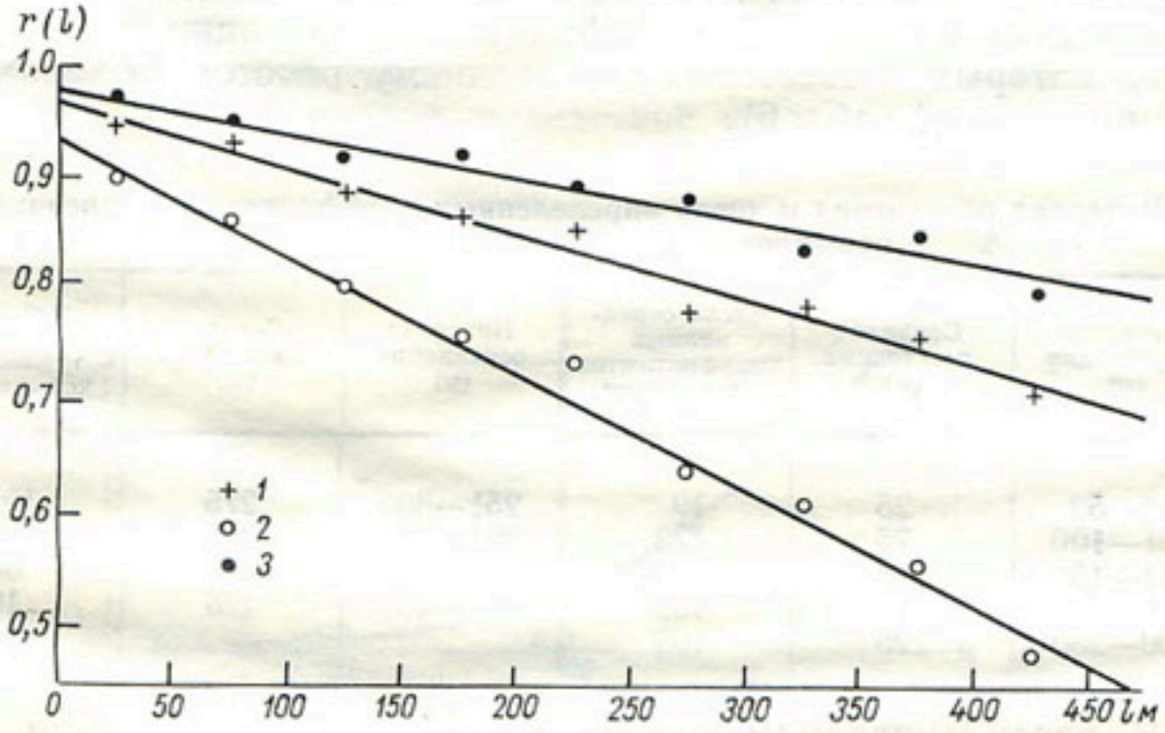


Рис. 8. Нормированные корреляционные функции глубин УГВ до полива (*1*), после полива (*2*) и в невегетационный период (*3*).

Таблица 7

Параметры нормированных корреляционных функций глубин УГВ

Параметр	Период вегетации		Невегетационный период
	до полива	после полива	
$H_{ср}$ см	371	305	320
σ см	52	95	32
r (0)	0,967	0,932	0,976
l_0 м	1060	590	1500
a	$560 \cdot 10^{-2}$	$110 \cdot 10^{-2}$	$350 \cdot 10^{-2}$

Приведенный табличный и графический материал говорит о сравнительно низких значениях ординат корреляционных функций и радиусов корреляции, особенно в период после вегетационных поливов, что свидетельствует об отсутствии на орошаемых полях под хлопчатником значительных по площади уча-

стков с высокой степенью синхронности колебаний глубин УГВ. Применительно, например, к периоду после поливов можно утверждать, что в пределах окружности диаметром 50 м (около 0,2 га) средний коэффициент корреляции между измеренными глубинами УГВ в любой паре скважин превысит лишь 0,88. Если же диаметр окружности увеличить до 200 м (около 3 га), то коэффициент корреляции между рядами глубин УГВ по любым двум произвольно выбранным внутри окружности скважинам снизится до 0,73.

Согласно данным табл. 7, в невегетационный период радиус корреляции в 1,4—2,5 раза выше, чем в период вегетации. Поэтому коэффициент корреляции между рядами глубин УГВ по любой паре скважин на той же площади в первом случае окажется выше, чем во втором. Например, на площади около 2 га (окружность диаметром 150 м) средние коэффициенты корреляции глубин УГВ по паре скважин отвечают значениям 0,78 (после полива) и 0,88 (до полива), а в невегетационный период для тех же условий 0,92.

В холодное полугодие степень синхронности ($r^2 \cdot 100\%$) глубин УГВ обеспечивается на достаточно высоком уровне. Для площадей порядка 3 га она превышает 80% и снижается до 35% лишь на площади 100 га. Наиболее низкой степенью синхронности, принимающей практически нулевое значение уже на площади порядка 40 га, отличаются периоды после вегетационных поливов хлопчатника.

Мелиоративное состояние земель обычно характеризуют глубиной залегания грунтовых вод и степенью их минерализации. Применительно к глубине УГВ можно утверждать, что эта величина изменяется с синхронностью около 50% для площадей порядка 20 га в конце межполивного интервала и лишь 5 га после полива. Влияние совокупности причин, нарушающих синхронность, имеет подчиненное значение для площадей порядка 18 га в первом случае и 4 га во втором, но при превышении этих значений указанное влияние становится преобладающим. В невегетационный период при отсутствии промывных или влагозарядковых поливов равенство совокупности причин, нарушающих синхронность и способствующих ей, наблюдается на площадях порядка 50 га.

Вследствие разнообразия микрорельефных условий и наличия в данных наблюдений за глубиной стояния УГВ случайных погрешностей параметр $r(0)$, которым аппроксимируется значение корреляционной функции при $l=0$, существенно отличается от единицы (табл. 7). В работе Г. А. Алексеева [13] показано, что с помощью этого параметра может быть определена погрешность искомой величины в долях от стандартного отклонения. Для расчетов предлагается формула

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{r(0)} - 1},$$

из которой следует, что в невегетационный период погрешность определения УГВ составляет 16%, до полива 18% и после полива 27% стандартного отклонения.

Средняя квадратическая погрешность экстраполяции E глубин УГВ на известное расстояние на основании корреляционных функций определяется по формуле

$$E = \sigma \sqrt{1 - |r(l)|^2}. \qquad (13)$$

Расчеты показывают, что в период до поливов хлопчатника глубины залегания УГВ экстраполируются, например, на 100 м со средней квадратической погрешностью 21,4 см, а после полива погрешность экстраполяции возрастает более чем вдвое. Если же расстояние экстраполяции увеличить до 500 м, то погрешность определения глубины УГВ до поливов составит около 39 см, а после них 86 см. В невегетационный период, характеризующийся сравнительно небольшим значением среднего квадратического отклонения глубин УГВ (табл. 7) и малой интенсивностью убывания корреляционной функции (рис. 8), погрешность экстраполяции почти удваивается при росте расстояний в 10 раз (с 50 до 500 м). В пределах расстояний, указанных в табл. 6, погрешность экстраполяции глубин УГВ в период после поливов в 2,2—2,7 раза больше, чем в конце межполивного интервала, и в 4,4—5,4 раза больше, чем в невегетационный период.

Теоретические разработки Г. А. Кагана [95] позволяют оценить точность определения средней глубины стояния грунтовых вод на заданной площади для случаев степенной ε и экспоненциальной ε_1 структур поля глубин УГВ по формулам:

$$\varepsilon = \sigma \sqrt{\frac{1 - r(0)}{n} + 0{,}24 \frac{r(0) S}{n^{3/2} L}},$$

$$\varepsilon_1 = \sigma \sqrt{\frac{1 - r(0)}{n} + 0{,}23 \frac{r(0) \sqrt{S}}{n^{3/2} l_0}}, \qquad (14)$$

в которых n — число скважин на заданной площади S, L — расстояние, на котором корреляционная функция принимает нулевое значение.

В этих формулах сумма членов подкоренных выражений характеризует совокупность погрешностей за счет микроорографического различия мест установки наблюдательных скважин (первое слагаемое) и за счет факторов, определяющих пространственную изменчивость глубин УГВ на заданной площади (второе слагаемое).

Относительная погрешность P вычисления средней на заданной площади глубин УГВ определяется из соотношения

$$P = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} H_i} \cdot 100\%. \qquad (15)$$

Таблица 8

Абсолютная (см) и относительная (%) погрешности определения средних по площади глубин УГВ в зависимости от числа равномерно распределенных по полю скважин

S га	n	Период вегетации				Невегетационный период	
		до полива		после полива			
		ε	P	ε	P	ε	P
0,5	2	25,5	6,9	45,3	14,9	12,9	4,0
	5	13,1	3,5	31,6	10,4	6,6	2,1
	10	8,0	2,2	19,3	6,3	4,0	1,2
	20	4,2	1,1	10,5	3,4	2,0	0,7
	50	2,1	0,6	6,3	2,1	1,3	0,4
1	2	35,5	9,6	85,2	27,9	17,9	5,6
	5	18,0	4,9	43,4	14,2	9,1	2,8
	10	10,9	2,9	26,1	8,6	5,5	1,7
	20	5,8	1,6	13,7	4,5	2,8	0,9
	50	3,1	0,8	8,3	2,7	1,7	0,5
3	2	60,7	16,4	145,5	47,7	30,6	9,6
	5	30,6	8,2	73,5	24,1	15,4	4,8
	10	18,3	4,9	43,9	14,4	9,2	2,9
	20	9,2	2,5	22,5	7,3	4,7	1,5
	50	5,6	1,5	13,4	4,4	2,8	0,9
5	2	78,2	21,1	187,3	61,4	39,4	12,3
	5	39,4	10,6	94,5	31,0	19,9	6,2
	10	23,5	6,3	56,3	18,5	11,8	3,7
	20	11,8	3,2	28,4	9,3	6,0	1,9
	50	7,1	1,9	17,0	5,6	3,6	1,1
10	2	110,4	29,8	264,5	86,7	55,6	17,4
	5	55,5	15,0	133,2	43,7	28,0	8,8
	10	33,1	8,9	79,3	26,0	16,7	5,2
	20	16,6	4,5	39,8	13,0	8,4	2,6
	50	9,9	2,7	23,8	7,8	5,0	1,6
50	2	246,6	66,5	590,3	193,5	124,2	38,8
	5	124,1	33,4	297,0	97,4	62,5	19,5
	10	73,8	19,9	176,6	57,9	37,1	11,6
	20	36,9	9,9	88,4	29,0	18,6	5,8
	50	22,0	5,9	52,9	17,3	11,1	3,5

На основании результатов подсчета погрешностей (табл. 8) может быть установлено оптимальное количество наблюдательных скважин применительно к конкретной площади орошаемого хлопкового поля. При этом нужно исходить из факта быстрого уменьшения погрешности оценки средней глубины УГВ с ростом количества скважин, так же как и с сокращением площади при том же количестве скважин. При прочих равных условиях в периоды после полива хлопчатника для оценки средней глубины УГВ на той же площади и с той же

равнообеспеченной погрешностью число скважин должно быть больше, чем в периоды до поливов и в холодное полугодие. Например, на площади 3 га относительная погрешность 7—10% в конце межполивного интервала обеспечивается закладкой пяти равномерно распределенных по полю скважин, а в невегетационный период оказывается достаточно двух скважин. Но применительно к периоду после поливов хлопчатника погрешность расчета средней глубины УГВ в размере 7,3% от определяемой величины возможна лишь при синхронных наблюдениях за динамикой грунтовых вод в 20 скважинах.

В настоящем разделе параметры пространственной изменчивости глубин УГВ на малых орошаемых площадях в период вегетации хлопчатника рассмотрены лишь для случаев до и после вегетационных поливов, когда пестрота глубин залегания грунтовых вод экстремальна. Очевидно, что расхождения между этими параметрами в указанные периоды сглаживаются после окончания полива, а для межполивных интервалов достаточной продолжительности могут принимать и нулевое значение. Поэтому в среднем для периода вегетации параметры изменчивости, равно как и параметры корреляционных функций, существенно отличаются от приведенных выше [182].

Глава 3

ДИНАМИКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Основной задачей искусственного орошения является поддержание в течение всего периода вегетации оптимальной влажности в корнеобитаемом слое почвы, при которой устанавливается наиболее благоприятное для растений соотношение воды и воздуха. Согласно существующим представлениям, верхняя граница оптимальной влажности, до которой целесообразно увлажнять почву при поливах, определяется величиной НВ и соответствует влажности, обеспечивающей практически неограниченную скорость подачи воды в корневую систему растений.

Точка зрения о равной доступности для растений всей продуктивной влажности между НВ и влажностью завядания [269] не нашла подтверждения в последующих исследованиях [14, 75, 204, 209]. В частности, С. Н. Рыжов [209] показал, что хлопчатник еще задолго до наступления влажности завядания начинает испытывать угнетение от недостатка воды, и на основании обобщения значительного объема фактического материала пришел к выводу о целесообразности опускать влажность корнеобитаемого слоя почвы не ниже 0,7 НВ. Впоследствии эта величина была названа влажностью разрыва капилляров [1]. Ей соответствует резкое снижение подвижности почвенной влаги и, следовательно, ее доступности для растений. Применительно к суглинистым почвенным разностям влажность разрыва капилляров как нижняя граница оптимальной влажности почвы принимается равной в среднем 0,70 НВ [1, 204].

Таким образом, в условиях правильно организованного орошения влажность корнеобитаемого слоя почвы колеблется от НВ до 0,70 НВ при глубоком залегании грунтовых вод и от КВ до 0,70 НВ при выклинивании капиллярной каймы в корнеобитаемый слой.

1. Изменение влажности почвы под влиянием поливов

Если упростить весьма подробную классификацию эпюры влажности почвы при орошении, выполненную С. И. Харченко [246], то на ней можно выделить лишь капиллярную и надкапиллярную зоны. При глубоком залегании УГВ мощность

капиллярной зоны равна высоте капиллярного поднятия, а экстремальные влажности почвы в зоне равны НВ и ПВ соответственно на верхней и нижней границах капиллярной каймы грунтовых вод. При глубине УГВ меньше $H_к$ вся эпюра влажности представляет собой капиллярную кайму, но запас влаги в верхнем горизонте почвы может быть меньше КВ и даже меньше НВ, когда интенсивность иссушения почвы при высокой испаряемости превышает интенсивность капиллярного подтока из глубжележащих горизонтов.

При глубине УГВ $H<H_к$ влажность в любой точке капиллярной каймы удовлетворительно описывается формулой С. Ф. Аверьянова [4]

$$\omega_y=\omega_1\sqrt{1-\frac{y}{H_к}\left[1-\left(\frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^2\right]}, \qquad (16)$$

где ω_y — влажность в капиллярной зоне на высоте y над зеркалом грунтовых вод, от которого ведется отсчет. Остальные обозначения прежние. Проверка формулы (16) показала, что отклонение измеренных величин влажности от рассчитанных не превосходит 15% при обеспеченности 85%.

Влажность надкапиллярной зоны нередко [64] экстраполируют от верхней границы капиллярной каймы до дневной поверхности на уровне НВ, что в подавляющем большинстве случаев не оправдывается. Поливные нормы, назначаемые по влажности корнеобитаемого слоя почвы, превосходят дефицит влажности с целью создания промывного эффекта поливов. Поэтому влажность надкапиллярной зоны, измеренная тотчас после прекращения полива, оказывается завышенной на величину гравитационной влаги, сток которой при глубоком залегании УГВ продолжается от 1 до 3 суток [166].

Надкапиллярная зона наиболее динамична, она быстро увлажняется при поливах или выпадении атмосферных осадков и иссушается в межполивные интервалы, а дефицит влаги, равный разности между фактическими и соответствующими НВ влагозапасами, убывает с глубиной по мере увеличения абсолютных значений влажности. Поскольку в капиллярной зоне дефицит влаги отсутствует, при глубине УГВ $H\leqslant H_к$ хлопчатник можно выращивать при поливной норме 300—500 м³/га или вообще обойтись без вегетационных поливов. В последнем случае высокие урожаи выращиваются только в течение одного года, а получение нормальных всходов в следующем году возможно лишь после проведения промывных поливов большими нормами [109].

В общем случае приращение влажности за полив

$$\Delta W=W_к-W_н,$$

где $W_к$ — запас влаги, сформировавшийся в почве после прекращения полива и стока гравитационной влаги, $W_н$ — влагозапасы на начало полива.

На одну и ту же дату полива начальная влажность почвы определяется глубиной стояния грунтовых вод, возрастая с приближением УГВ к дневной поверхности. На этом основаны рекомендации снижать поливные нормы по мере уменьшения глубины залегания слабоминерализованных грунтовых вод [79].

И. Г. Сабинина [213] установила зависимость продолжительности периода от посева до всходов хлопчатника от температурного режима приземного слоя воздуха и влажности почвы. Если решать обратную задачу, то обнаружится, что дефицит влажности почвы к началу первого вегетационного полива зависит

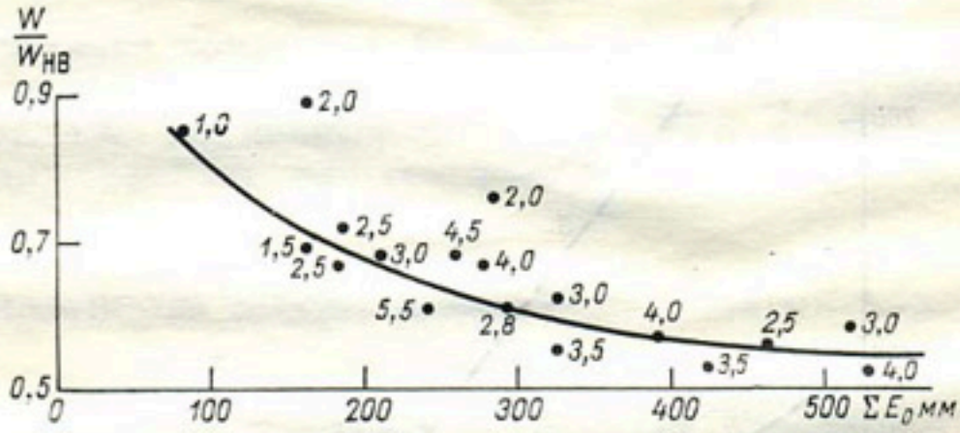


Рис. 9. Дефицит влажности почвы в слое 0—50 см к началу первого вегетационного полива в зависимости от сумм испаряемости за период от всходов хлопчатника до даты полива.

Цифры у точек — глубина УГВ в метрах.

в основном от сумм испаряемости за период от посева до первого полива, а глубина УГВ играет второстепенную роль (рис. 9).

За время полива в зоне аэрации аккумулируется часть поливной нормы (в сумме с атмосферными осадками) за вычетом питания грунтовых вод, дренажа и потерь на испарение. Если принять, что общее питание грунтовых вод за время полива V слагается из приращения их запасов и растекания на соседние поля, то конечные влагозапасы зоны аэрации определятся из соотношения

$$W_к = W_н + m_н - V, \qquad (17)$$

где $m_н$ — поливная норма нетто.

Согласно рис. 2, общее питание грунтовых вод $V = f(m, H)$. Из этого рисунка в первом приближении следует, что

$$V = \frac{am}{a + H^2}, \qquad (18)$$

где a — коэффициент, зависящий от механического состава грунтов зоны аэрации, равный для средних суглинков 2,83.

Подставляя (18) в (17), получаем зависимость

$$W_к = W_н + \frac{H^2 m}{a + H^2}, \qquad (19)$$

позволяющую оценить приращение влажности (мм) во всей зоне аэрации, сложенной грунтами конкретного механического

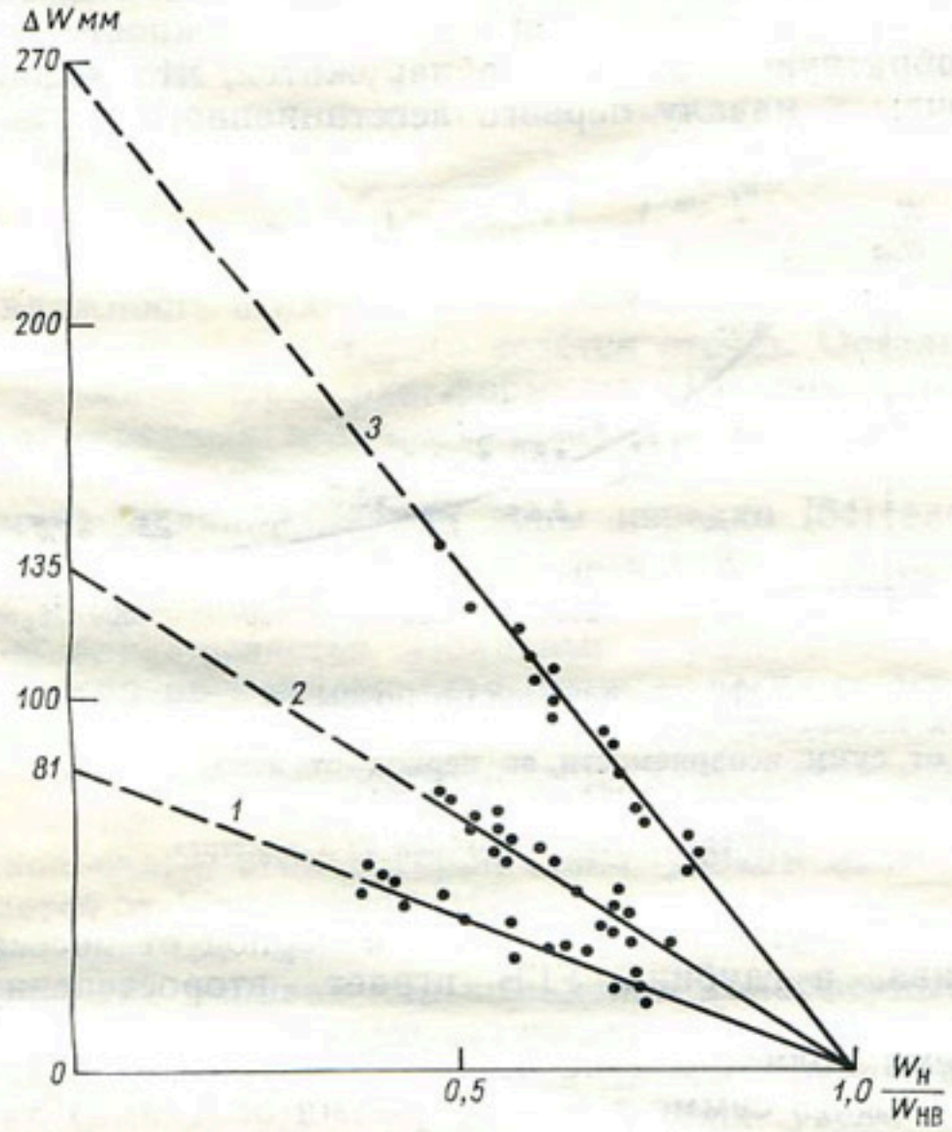


Рис. 10. Приращение запасов влаги за полив в надкапиллярной зоне в зависимости от исходной влажности.

1 — слой почвы 0—30 см, *2* — то же 0—50 см, *3* — то же 0—100 см.

состава, по данным о поливной норме (мм) и глубине УГВ (м) для случаев, когда можно пренебречь потерями на испарение.

В надкапиллярной зоне приращение влажности за полив целиком определяется начальными влагозапасами

$$\Delta W = W_{нв}\left(1 - \frac{W_н}{W_{нв}}\right) = W_{нв} - W_н. \qquad (20)$$

На этом принципе основан метод определения наименьшей влагоемкости почв по выборке максимальных устойчивых вели-

чин влажности [203], позволяющий обойтись без трудоемких и длительных определений влажности на предварительно залитой и предохраненной от испарения площадке. Графической интерпретацией того же метода, дающей хорошее согласование со стандартными определениями НВ [126], является зависимость $\Delta W = f(W_н)$, которая отсекает на оси ординат отрезок, равный $W_{нв}$ при $W_н = 0$ (рис. 10).

В случае выпадения атмосферных осадков слоем $x \leqslant 5$ мм

$$W_к = W_н + x, \tag{21}$$

при $x > 5$ мм

$$W_к = W_н + (x - V_x), \tag{22}$$

где V_x — питание грунтовых вод атмосферными осадками, определяющееся при отсутствии испарения за время выпадения дождя [187, 192] по данным о глубине УГВ и продолжительности бездождного периода (см. рис. 5).

2. Влажность почвы в межполивные интервалы

Тотчас после прекращения полива влажность горизонтов надкапиллярной зоны превышает НВ почвы, и требуется некоторое время для стока свободной гравитационной воды. По данным И. Г. Мушкина и В. К. Гафурова [166], экспериментировавших в условиях глубокого (более 10 м) залегания УГВ, наивысшая после стекания воды влажность почвы устанавливается через 1—3 суток после полива в зависимости от поливной нормы и мощности слоя промачивания. Согласно нашим наблюдениям, этот интервал времени T зависит от глубины УГВ следующим образом:

H см	100	200	300	400	500
T сут.	4—5	3—4	2—3	2—3	1—2

т. е. в условиях, когда поливная норма превышает дефицит влаги в почве, чем глубже залегает УГВ, сформировавшийся к концу полива, тем меньше интервал времени, необходимый для стока гравитационной воды. В этот интервал сработка влагозапасов зоны аэрации происходит как в результате суммарного испарения, так и по причине стока гравитационной воды, но в последующем сработка влагозапасов определяется лишь суммарным испарением и интенсивностью расхода грунтовых вод в зону аэрации, зависящими от их глубины и фазы развития растительности (см. рис. 6).

Исходя из упрощенного уравнения водного баланса зоны аэрации для межполивного интервала, можно написать

$$W_к = W_н - E + \mu \Delta H_{\downarrow}, \tag{23}$$

где $\mu \Delta H_{\downarrow}$ — расход грунтовых вод в зону аэрации, которым, согласно рис. 6, можно пренебречь в начальные и конечные фазы развития хлопчатника при $H \geqslant 2{,}5$ м, а в фазы максимального его развития — при $H \geqslant 3$ м. В диапазоне глубины УГВ, обеспечивающей интенсивное капиллярное подпитывание, уравнение (23) с учетом (10) перепишем в виде

$$W_к = W_н + E\left[a\sqrt{b-(H+c)^2}-(d+1)\right]. \qquad (24)$$

А. П. Гальцов [55] изменение влажности представляет степенной зависимостью от времени

$$W_к = W_н (T_к/T_н)^{-\alpha}, \qquad (25)$$

где α — эмпирический коэффициент, характеризующий интенсивность сработки запасов влаги в интервале времени от $T_к$ до $T_н$. И. Г. Мушкин и В. К. Гафуров [166] нашли, что для района Ашхабада при глубине УГВ более 10 м коэффициент α связан с испаряемостью и мощностью активного слоя почвы h следующим соотношением:

$$\alpha = \frac{E_0}{10\,(2h+1)}.$$

Анализируя результаты учащенных наблюдений за влажностью орошаемой почвы под хлопчатником и люцерной, О. Е. Бусарова [43] пришла к заключению, что бóльшая часть зависимостей изменения влагозапасов почвы от времени может быть описана экспоненциальной функцией вида

$$W_к - W_0 = (W_н - W_0)\, e^{-\alpha T_к},$$

где W_0 — влажность почвы, которая может установиться при $T \to \infty$. Поскольку W_0 равно, по-видимому, $W_{вз}$, то это уравнение описывает изменение во времени не общих, а продуктивных влагозапасов зоны аэрации.

Имеющиеся в нашем распоряжении фактические данные позволяют детально проследить изменение влажности во времени при различном положении уровня грунтовых вод. Но предварительно необходимо установить слой почвы, влажность которого с известной степенью приближения находилась бы в равных условиях с точки зрения влияния метеорологических факторов и глубины залегания УГВ.

Влажность поверхностных слоев почвы уже на 5—6-й день после полива резко уменьшается, при этом образуется корка толщиной до 4 см [166]. Если же рассматривать влажность всего корнеобитаемого слоя почвы, то при близком стоянии УГВ возможны случаи, когда интенсивное потребление влаги растительным покровом в совокупности с физическим испарением с поверхности почвы не влечет за собой значительного уменьшения влагозапасов, поскольку интенсивность капиллярного подпиты-

вания зоны аэрации со стороны грунтовых вод может быть соизмерима с интенсивностью сработки влагозапасов.

Анализируя в этих условиях принципы сокращения числа замеров влажности по горизонтам зоны аэрации, А. А. Аппин [20] пришел к выводу, что горизонтом, характерным для определения влажности, является глубина 30 см от поверхности. А. Е. Власенко [51] по влажности почвы на глубине 30 см предлагает определить влагозапасы полуметрового и метрового слоев

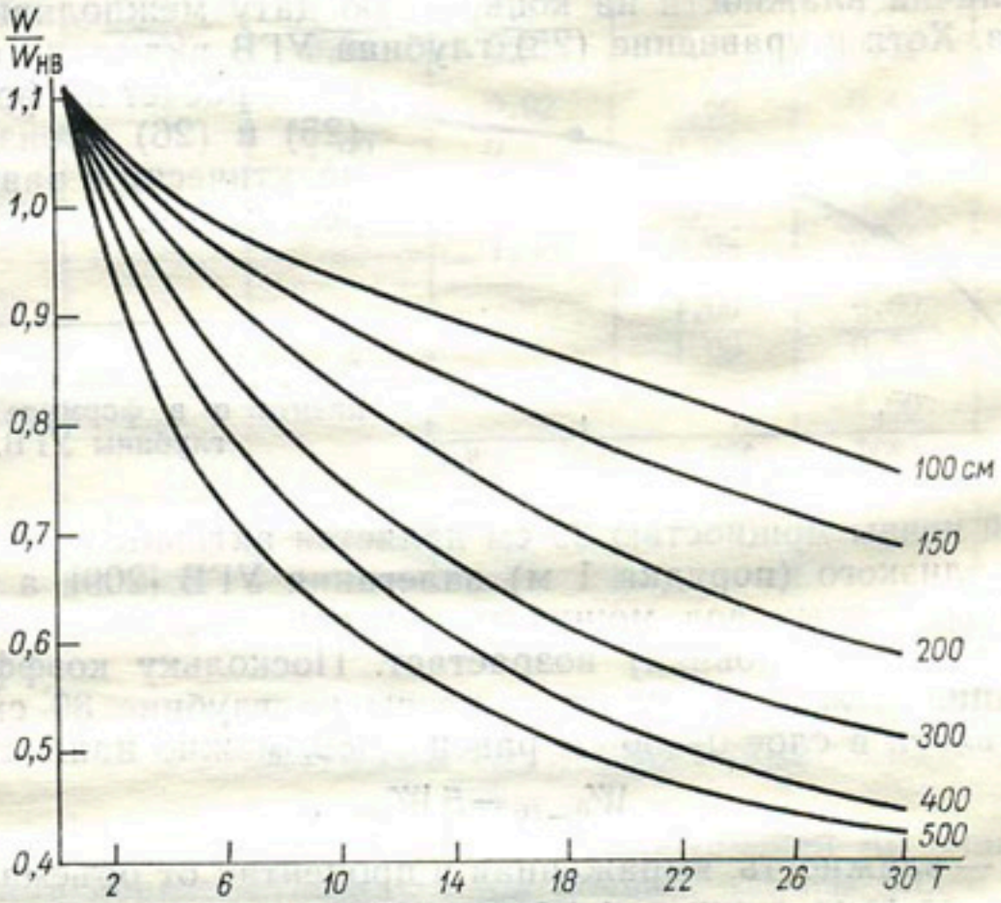


Рис. 11. Зависимость влажности почвы на глубине 30 см от числа дней после полива и глубины УГВ (цифры у кривых).

почвы, а по мнению Л. Н. Филиппова [239] влажность почвы на глубине 30 см является важным показателем для установления режима орошения хлопчатника.

Полагая, что горизонт 30 см отвечает поставленным выше условиям, используем информацию об изменении влажности во времени применительно к скважинам, для которых достоверно известны дата прекращения полива и глубина УГВ. Эта информация обобщена в виде зависимости $W/W_{нв}=f(H, T)$ (рис. 11), которая подчиняется уравнению

$$\frac{W_к}{W_{нв}}=\frac{W_{вз}}{W_{нв}}+\left(\frac{W_н}{W_{нв}}-\frac{W_{вз}}{W_{нв}}\right)e^{-\beta HT}, \qquad (26)$$

где β — численный коэффициент, равный для рассматриваемых условий 0,0245, H — глубина УГВ (м).

Более подробное обоснование зависимости, представленной на рис. 11, дано в работе [181].

Изменение влагосодержания в рассматриваемом слое почвы может быть выражено и степенной зависимостью от времени при $\alpha = f(H)$ (рис. 12). Расчет сработки влагозапасов по уравнению (25) при значениях α, снятых с рис. 12, обеспечивает в 85% случаев не более чем 5%-ное отклонение от средних из измеренных величин влажности на конкретную дату межполивного интервала. Хотя в уравнение (25) глубина УГВ включена в явном виде, расчет по формулам (25) и (26) производится практически с равной погрешностью.

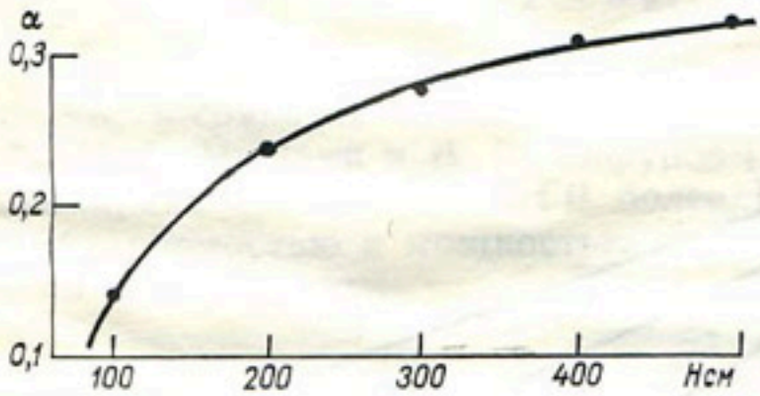


Рис. 12. Зависимость коэффициента α в формуле (48) от глубины УГВ.

Слой почвы мощностью 30 см является активным лишь в условиях близкого (порядка 1 м) залегания УГВ [209], а с понижением грунтовых вод мощность активного слоя почвы (при прочих равных условиях) возрастает. Поскольку коэффициент корреляции между влажностью почвы на глубине 30 см и запасами влаги в слое 0—50 см равен 0,989, можно написать

$$W_{0-50} = 5\,W_{30},$$

где W_{30} — влажность, выраженная в процентах от объема почвы. Переход от этих данных к последующим полуметровым слоям почвы может быть выполнен по уравнению регрессии вида

$$W_{50-100} - \overline{W}_{50-100} = a\,(W_{0-50} - \overline{W}_{0-50}), \qquad (27)$$

где коэффициент регрессии $a = r\sigma_x/\sigma_y$.

Если рассматривать парные коэффициенты корреляции между влагозапасами полуметровых слоев почвы в условиях фактической динамики УГВ в период вегетации хлопчатника, то можно заключить, что наилучшая связь существует между влагозапасами смежных слоев. Однако эта закономерность после четвертого полуметрового слоя нарушается (табл. 9).

Данные табл. 9 свидетельствуют о практическом отсутствии зависимости колебания влагозапасов пятого и особенно шестого полуметрового слоя от влажности вышележащих горизонтов зоны аэрации. Следовательно, уравнения регрессии, аналогичные (27), не могут распространяться на глубину, превосходящую мощность корнеобитаемого слоя почвы.

Таблица 9

Парные коэффициенты корреляции влагозапасов полуметровых слоев почвы в начале (числитель) и в конце (знаменатель) межполивного интервала

Слой почвы (см)	Слой почвы (см)					
	0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300
0—50	1,00 / 1,00	0,92 / 0,94	0,87 / 0,91	0,71 / 0,90	0,40 / 0,52	—0,10 / 0,21
50—100		1,00 / 1,00	0,92 / 0,97	0,86 / 0,96	0,41 / 0,56	0,06 / 0,30
100—150			1,00 / 1,00	0,97 / 0,98	0,50 / 0,63	0,13 / 0,34
150—200				1,00 / 1,00	0,60 / 0,78	0,27 / 0,37
200—250					1,00 / 1,00	0,46 / 0,54
250—300						1,00 / 1,00

3. Зависимость влажности почвы от глубины залегания грунтовых вод

При глубине грунтовых вод, исключающей их влияние на влажность корнеобитаемого слоя почвы, запасы влаги с удовлетворительной для практических целей точностью могут рассчитываться по климатическим данным [137, 153] или по результатам актинометрических и градиентных наблюдений на орошаемых полях [162, 234]. Но при орошении земель с затрудненным естественным оттоком грунтовых вод влияние последних на влажность зоны аэрации велико и сохраняется в период эксплуатации инженерных мелиоративных систем, вследствие чего глубина УГВ является важным показателем как общих влагозапасов, так и характера их распределения по глубине.

В зоне капиллярной каймы влажность почвы в зависимости от глубины УГВ, как уже отмечалось, хорошо описывается уравнением (16), но влияние грунтовых вод, хотя и в меньшей степени, распространяется и на надкапиллярную зону, что следует, например, из рис. 11.

Х. А. Аманов [16] установил, что при близком стоянии УГВ влажность почвы мало зависит от фона (хлопчатник, люцерна, перелог) и всецело определяется глубиной УГВ. Для

вегетационного периода этим автором предложена расчетная зависимость

$$W_{0-100} = 350/H^{2/3} \text{ мм.} \quad (28)$$

В. К. Константинов [121] предлагает параболическую зависимость в виде

$$W_{0-50} = 0{,}05H^2 - 5H + 330 \text{ мм.}$$

Аналогичная зависимость применительно к верхнему метровому слою почвы под люцерной, орошаемой дождеванием, получена В. А. Леоновым [145].

Некоторые авторы [64, 98] предлагают расчетные методы для слоя почвы, превышающего по мощности зону аэрации.

Запас влаги во всей зоне аэрации при условии стабильности средней влажности [183] можно оценить по данным о глубине УГВ, как это делал, например, С. И. Харченко [245].

В первом приближении вертикальное распределение влажности почвы по горизонтам зоны аэрации, в том числе и в надкапиллярной зоне, можно определить, используя в качестве технического приема средние из наблюденных эпюры влажности, соответствующие конкретной глубине стояния УГВ. При подсчете средних значений влажности вычислялись и параметры ее изменчивости, которые в данном случае характеризуют абсолютную $\sigma(W)$ и относительную $C_v(W)$ погрешности определения влажности по средней эпюре.

Естественно, наибольшими относительными погрешностями (10—25%) отличаются горизонты надкапиллярной зоны, влажность которых наиболее динамична. При глубине УГВ 100 см среднее квадратическое отклонение влажности всех горизонтов наименьшее по сравнению с соответствующими величинами σ при более глубоком залегании УГВ (табл. 10).

Капиллярное подпитывание почвенно-грунтового профиля, сглаживающее изменчивость влагозапасов во времени, позволяет проследить зависимость коэффициента вариации влажности от глубины горизонта зоны аэрации. Эта зависимость (рис. 13), с помощью которой может быть определена относительная погрешность оценки влажности по средней эпюре, аппроксимируется гиперболической функцией вида

$$C_v(W) = A/H^x, \quad (29)$$

где A — максимальная изменчивость влажности почвы при $H = 1$ м, x — численный коэффициент. Параметры уравнения (29) в зависимости от глубины УГВ имеют следующие значения:

H	100	200	300	400	500
A	0,050	0,100	0,145	0,170	0,190
x	0,93	0,70	0,46	0,36	0,30

Таблица 10

Средняя влажность почвы $W/W_{НВ}$, ее среднее квадратическое отклонение σ (% от объема) и коэффициент вариации C_v при различной глубине залегания грунтовых вод

Элемент	Глубина от поверхности (см)											Слой почвы 0—100 см
	10	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
					$H \approx 100$ см, число случаев 168							
$W/W_{НВ}$	0,72	0,82	1,22	—	—	—	—	—	—	—	—	0,92
σ	2,4	1,6	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	1,9
C_v	0,10	0,06	0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	0,07
					$H \approx 200$ см, число случаев 478							
$W/W_{НВ}$	0,68	0,79	1,00	1,18	1,28	—	—	—	—	—	—	0,82
σ	3,5	2,6	2,6	2,4	2,6	—	—	—	—	—	—	2,9
C_v	0,18	0,12	0,10	0,08	0,07	—	—	—	—	—	—	0,13
					$H \approx 300$ см, число случаев 975							
$W/W_{НВ}$	0,62	0,75	0,88	1,09	1,17	1,26	1,34	—	—	—	—	0,75
σ	4,4	4,1	3,0	2,7	3,2	3,1	2,9	—	—	—	—	3,8
C_v	0,25	0,23	0,14	0,10	0,10	0,10	0,09	—	—	—	—	0,21
					$H \approx 400$ см, число случаев 567							
$W/W_{НВ}$	0,61	0,71	0,77	0,98	1,04	1,09	1,16	1,19	1,35	—	—	0,70
σ	3,9	3,5	3,0	2,7	3,0	3,0	3,1	2,9	2,8	—	—	3,5
C_v	0,25	0,21	0,16	0,14	0,14	0,11	0,11	0,09	0,10	—	—	0,21
					$H \approx 500$ см, число случаев 194							
$W/W_{НВ}$	0,58	0,68	0,75	0,88	0,93	0,96	1,08	1,10	1,17	1,22	1,33	0,67
σ	3,8	3,6	3,5	3,3	3,5	3,7	3,7	3,3	3,5	3,0	2,7	3,6
C_v	0,25	0,23	0,19	0,16	0,14	0,14	0,14	0,12	0,12	0,10	0,09	0,23

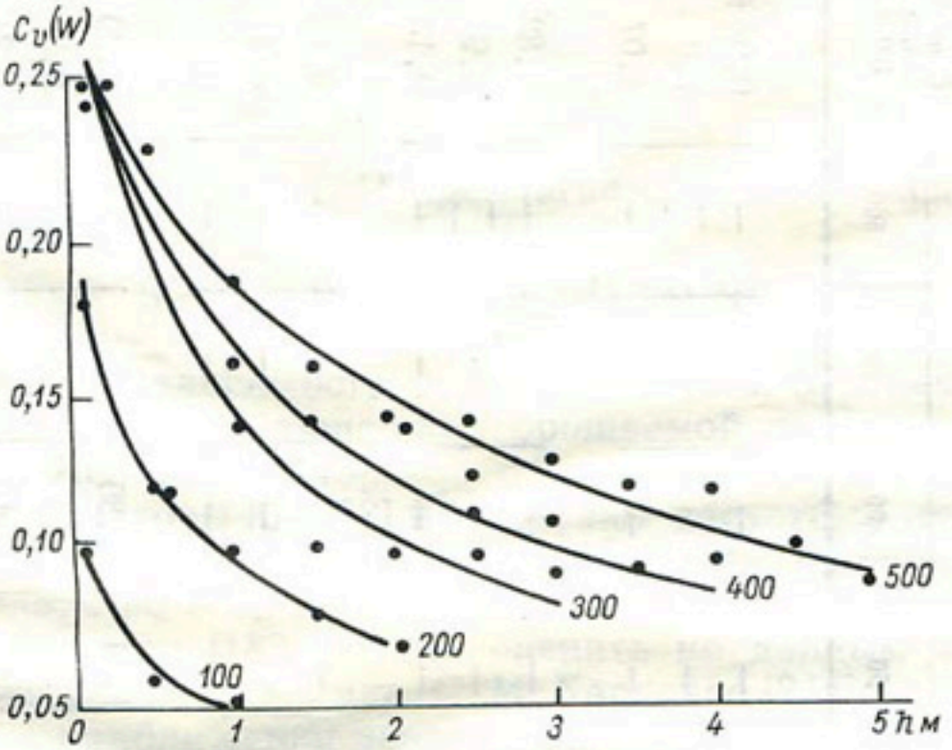


Рис. 13. Зависимость коэффициента вариации влажности почвы под хлопчатником от глубины горизонта зоны аэрации.

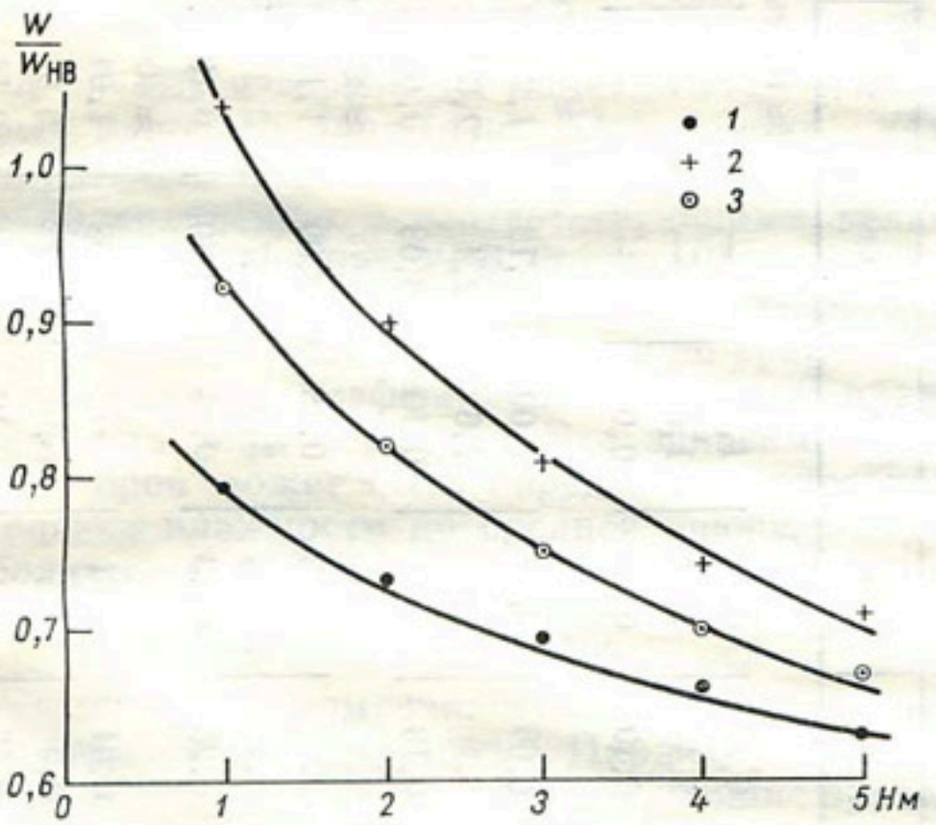


Рис. 14. Зависимость средней влажности почвы в слоях 0—50 см *(1)*, 50—100 *(2)* и 0—100 см *(3)* от глубины залегания грунтовых вод.

На основании данных табл. 10 построена зависимость средней влажности основных корнеобитаемых горизонтов почвы от глубины УГВ (рис. 14), которая подчиняется уравнению

$$\frac{W}{W_{НВ}} = \frac{W_{ВЗ}}{W_{НВ}}\left(1 + \frac{B}{\sqrt{H}}\right), \qquad (30)$$

где H — глубина УГВ (м), B — численный коэффициент, равный 1,42 для слоя почвы 0—100 см и 1,68 для слоя 50—100 см, а для первого полуметрового слоя $B = 0{,}95$, но влажность почвы в этом случае обратно пропорциональна $\sqrt[3]{H}$.

С помощью методики, изложенной в [13], представляется возможным получить уравнение нормализованной регрессии вида [1]

$$U(W/W_{НВ}) = rU(H), \qquad (31)$$

где r — коэффициент корреляции между нормализованными величинами влажности почвы и глубиной УГВ.

Таблица 11

Коэффициенты корреляции между послойными влагозапасами и глубиной УГВ

Слой почвы (см)	$-r$	Слой почвы (см)	$-r$	Слой почвы (см)	$-r$
0—50	0,47	150—200	0,78	0—100	0,70
50—100	0,65	200—250	0,81	0—200	0,80
100—150	0,74	250—300	0,83	0—300	0,81

Как видно из данных табл. 11, коэффициенты корреляции увеличиваются с глубиной, т. е. чем глубже залегает слой почвы, влажность которого определяется, тем больше она зависит от положения грунтовых вод. Дисперсия влагозапасов первого полуметрового слоя лишь на 22% объясняется колебаниями глубины УГВ, второго — на 42%, а пятого, например, уже на 66%.

Если обратиться к слою почвы 0—100 см, информация о влагозапасах которого поступает с агрометеорологических станций, то можно заключить, что в объеме исследуемой выборки динамика глубины УГВ описывает лишь около 50% дисперсии влажности. Включив в уравнение (31) фактор, характеризующий изменение внешних условий, например дефицит влажности воздуха, мы получим сводный коэффициент корреляции 0,81, при котором глубина УГВ и дефицит влажности воздуха в совокупности описывают уже около 66% дисперсии влагозапасов. Доля вклада учитываемых факторов равна соответственно 0,846 и 0,154, т. е. она больше удвоенной средней квадратической

[1] Анализ исходных данных и расчеты на ЭВМ выполнены А. М. Ляховским.

погрешности сводного коэффициента корреляции, равной 0,04. На основании этого можно утверждать, что оба фактора эффективны и могут быть использованы в расчетах. Тогда уравнение (31) перепишем в виде

$$U(W/W_{НВ}) = \alpha_1 U(H) + \alpha_2 U(d), \qquad (32)$$

где α_1, α_2 — коэффициенты регрессии, равные —0,778 и —0,398 соответственно. Нормализованные значения глубины УГВ $U(H)$

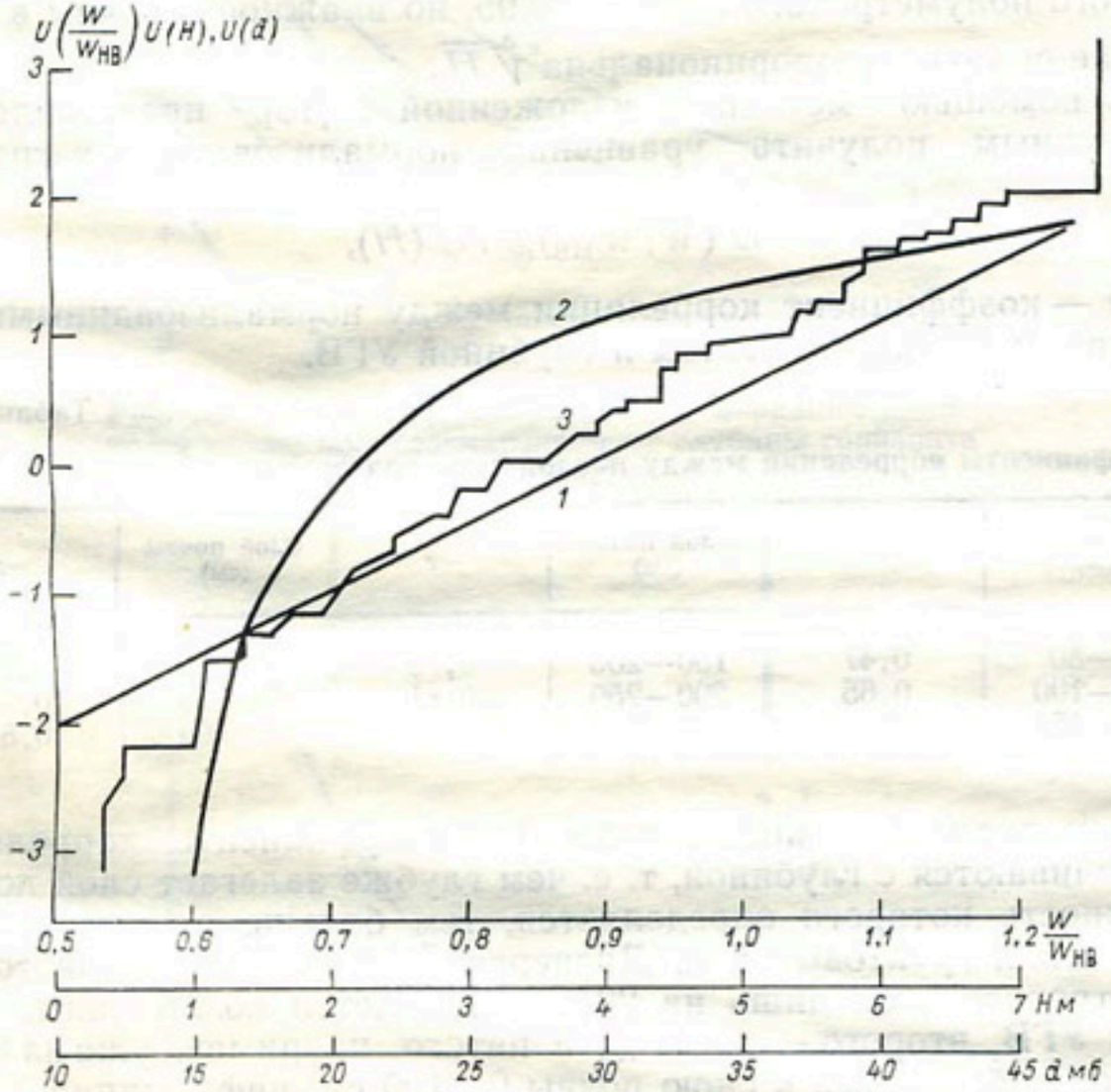


Рис. 15. Связь нормализованных величин влагозапасов слоя почвы 0—100 см (*1*), глубины УГВ (*2*) и дефицита влажности воздуха (*3*) с их фактическими значениями.

и дефицита влажности воздуха $U(d)$ определяются в соответствии с рис. 15.

Погрешность расчета влагозапасов по уравнению (32) во многом определяется остаточной дисперсией (34%), являющейся следствием как отсутствия в расчетном уравнении других факторов, влияющих на влажность почвы, так и погрешностями натурных измерений всех элементов, слагающих это уравнение.

Проверка расчетных уравнений на независимом фактическом материале показала, что отклонение рассчитанных значений вла-

гозапасов верхнего метрового слоя почвы от измеренных не превышает 15% определяемой величины при обеспеченности 80%. Все же при глубине УГВ 1 м уравнение (30), а при глубине 2 м уравнение (28) почти в 70% случаев завышают влажность в среднем на 7%. Поэтому при соответствующей информации предпочтение следует отдавать формуле (32), по которой та же погрешность расчета (15%) обеспечена на 88% в диапазоне глубин УГВ 1—5 м.

4. Пространственная изменчивость влажности орошаемой почвы под хлопчатником

Известно, что влажность почвы определяется, как правило, в ограниченном числе пунктов и при экстраполяции полученных результатов на окружающую территорию неизбежно допускается погрешность, обусловленная значительной пространственной изменчивостью влажности почвы. Пестрота распределения влажности имеет место как на малых [122], так и на больших [89] площадях, что диктует необходимость использования значительной повторности измерений для объективной оценки средних влагозапасов на заданной площади. В противном случае наибольшая относительная погрешность найденного приращения влагозапасов за расчетный интервал времени может на порядок превышать инструментальную погрешность определения влажности в точке [147].

Пространственная изменчивость влажности искусственно орошаемых почв больше, чем естественно увлажненных, уже в силу того, что орошение заданной площади производится не одновременно, а по частям при любом способе полива. Поэтому на искусственно орошаемом поле могут соседствовать между собой участки, увлажненные в период полива до полной влагоемкости и иссушенные до влажности разрыва капиллярной связи, а нередко и ниже.

Пестроте распределения влажности в границах уже политой площади способствует и микрорельеф. При неизменном местоположении положительных и отрицательных форм микрорельефа неравномерность влагозапасов, обусловленная этой причиной, остается относительно стабильной [145], но в процессе обработки почв формы микрорельефа могут меняться, тогда изменятся и показатели пространственной изменчивости влажности почвы на заданной площади. При орошении хлопчатника запас влаги на микропонижениях, где и УГВ выше, на 18—30% превышает соответствующую величину на положительных формах микрорельефа [180], следовательно, одним из путей увеличения равномерности распределения оросительной воды, глубины УГВ и влажности почвы является повышение требований к качеству планировочных работ.

При прочих равных условиях пространственная изменчивость влажности почв определяется пестротой их водно-физических свойств, следующей, как правило, за изменчивостью механического состава. Ранее отмечалось [177], что вариация влажности по естественно увлажняемой площади во многом определяется пестротой свойств почв, особенно в конце сухого периода. Поэтому среднее квадратическое отклонение ряда объемных влажностей, нормированных по продуктивной составляющей, всегда ниже, чем при рассмотрении величин влажности в весовом выражении. Например, общий запас влаги в верхнем метровом слое почвы, измеренный 18 июня 1964 г. на богарном поле агрометстанции Каттакурган, составил 74 мм, станции Галляарал — 99 мм и станции Милютинской — 112 мм, т. е. максимальное отклонение оказалось равным 26 мм, или 27,4% средней величины. Но если учесть различия в величинах влажности завядания (соответственно 81, 107 и 118 мм), то становится очевидным, что в слое почвы 0—100 см всех трех опытных полей имел место практически один и тот же дефицит продуктивной влаги. В то же время С. И. Смирнова и Е. В. Мамаев [228] полагают, что при выражении влажности почвы в миллиметрах общих влагозапасов коэффициент вариации статистических рядов уменьшается в 2—4 раза по сравнению с теми же рядами, влажность которых выражена в миллиметрах продуктивных влагозапасов.

В условиях орошения важнейшим фактором, определяющим степень пространственной изменчивости влажности почвы, является глубина залегания грунтовых вод, влияние которой, по данным В. А. Леонова [145], в 10—30 раз превышает максимальное влияние микрорельефа. Чем ближе к поверхности залегают грунтовые воды, тем больше проявляется их сглаживающее влияние, особенно в случаях, когда эпюра влажности не слишком отличается от капиллярной каймы, а сама влажность равна капиллярной влагоемкости. С увеличением глубины УГВ больше проявляется влияние микрорельефа, пестроты фенологических параметров хлопчатника и возрастает неравномерность распределения влажности по площади орошаемого поля в межполивные интервалы. Этот вывод подтверждается фактическими данными (рис. 16).

Но независимо от положения УГВ коэффициент вариации влажности понижается с глубиной, причем влагозапасы уже второго полуметрового слоя на 11—18% стабильнее первого (табл. 12).

Обратимся к вопросу влияния полива на пространственную изменчивость почвенной влажности. Принято считать, что каждый вегетационный полив увеличивает пестроту влагозапасов во всех горизонтах зоны аэрации в силу неравномерности распределения оросительной воды по площади сельскохозяйственного поля. По данным Л. А. Разумовой [194], каждый полив увеличивает пространственную изменчивость влажности почвы,

и потому повторность бурения для термостатно-весовых измерений после полива должна быть в 2—3 раза больше, чем перед ним, для обеспечения той же точности учета средних влагозапасов. Этот вывод соответствует глубокому (более 5 м) зале-

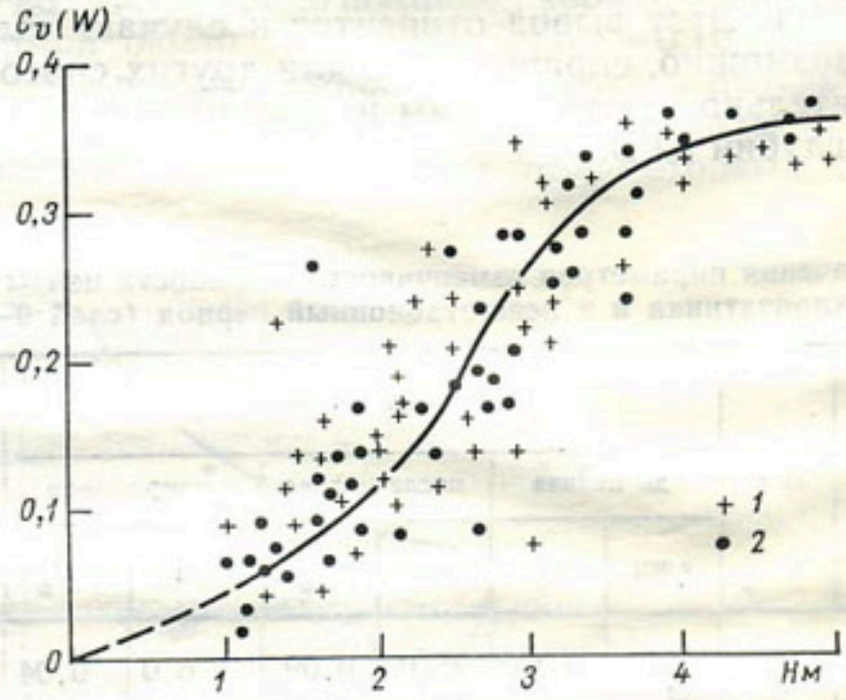


Рис. 16. Зависимость коэффициента вариации влагозапасов в слое почвы 0—50 см (*1*) и 0—100 см (*2*) от глубины УГВ.

ганию грунтовых вод и хорошо согласуется с данными, относящимися к новой зоне орошения Голодной степи при глубине УГВ 3—5 м [180].

Таблица 12

Коэффициенты вариации глубины УГВ и влажности полуметровых слоев почвы при различном положении грунтовых вод

Глубина УГВ (см)	C_v (*H*)	C_v (*W*) в слое почвы (см)					
		0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300
100	0,22	0,09	0,08	—	—	—	—
200	0,20	0,14	0,12	0,12	0,11	—	—
300	0,18	0,22	0,12	0,11	0,11	0,10	0,11
400	0,17	0,32	0,25	0,18	0,17	0,17	0,16
500	0,14	0,33	0,20	0,18	0,16	0,15	0,16

Однако влияние полива может проявляться по-разному в зависимости от исходной глубины УГВ, близкое стояние которого, как уже отмечалось, сглаживает пестроту распределения влажности по площади. Если сравнить статистические параметры

изменчивости, вычисленные отдельно за периоды до и после полива (табл. 13), то можно заключить, что при близком (1—2 м) стоянии грунтовых вод вегетационные поливы способствуют увеличению равномерности увлажнения корнеобитаемого слоя почвы, но при $H \geqslant 3$ м неравномерность увлажнения после полива возрастает. Этот вывод относится к случаю полива по бороздам, но, возможно, справедлив и для других способов орошения, применительно к которым мы не располагаем необходимым диапазоном глубин УГВ.

Таблица 13

Средние значения параметров изменчивости влажности почвы в период вегетации хлопчатника и в невегетационный период (слой 0—100 см)

Способ орошения	H м	Период вегетации						Невегетационный период	
		до полива		после полива		приращение			
		σ мм	C_v	σ мм	C_v	σ мм	C_v	σ мм	C_v
По бороздам	1	31,0	0,13	25,0	0,09	6,0	0,04	29,6	0,14
	2	44,4	0,15	40,5	0,14	3,9	0,01	33,9	0,13
	3	32,3	0,19	44,0	0,22	—11,7	—0,03	40,8	0,13
	4	41,0	0,24	62,3	0,31	—21,3	—0,07	42,1	0,16
	5	42,4	0,24	66,5	0,35	—22,1	—0,11	41,9	0,17
Дождевание	3—4	32,1	0,14	34,0	0,16	—1,9	—0,02	—	—
ВПО	2—3	15,0	0,06	23,0	0,09	—8,0	—0,03	—	—

Согласно данным табл. 13, в среднем за период вегетации наиболее равномерно увлажняется почва при внутрипочвенном способе орошения, а наименее равномерно — при бороздковом (при тех же глубинах УГВ). Дождевание (ДМ «Фрегат») занимает промежуточное положение.

В невегетационный период степень пространственной изменчивости влажности почвы в основном зависит от микрорельефа, глубины и качества вспашки, а влияние глубины УГВ проявляется слабо (табл. 13).

Говоря о том, что вегетационные поливы уменьшают пестроту влажности при близком залегании грунтовых вод и увеличивают ее при глубоком УГВ, нельзя не отметить и влияние скорости водоподачи на заданную площадь. Очевидно, что затянутые поливы с малой суточной водоподачей сопровождаются большой неравномерностью почвенного увлажнения. Энергичные поливы, проведенные в сжатые сроки, должны меньше увеличивать пестроту увлажнения. Обработка фактических данных в этом направлении подтвердила наличие зависимости между приращением $C_v(W)$ за полив и скоростью водоподачи при бороздковом оро-

шении, причем приращения $C_v(W)$ за полив при разной скорости водоподачи в условиях близкого и глубокого залегания УГВ примерно равны, но имеют разный знак (рис. 17).

При дождевании и внутрипочвенном орошении влияние полива на приращение пестроты влажности сказывается в меньшей степени, но возрастает роль поливной нормы. Например, при дождевании нормой около 500 м³/га $C_v(W)=0{,}10\div0{,}15$, а при повышении нормы полива до 800—1000 м³/га в результате поверхностного перераспределения поливной воды коэффициент вариации влажности первых двух полуметровых слоев почвы

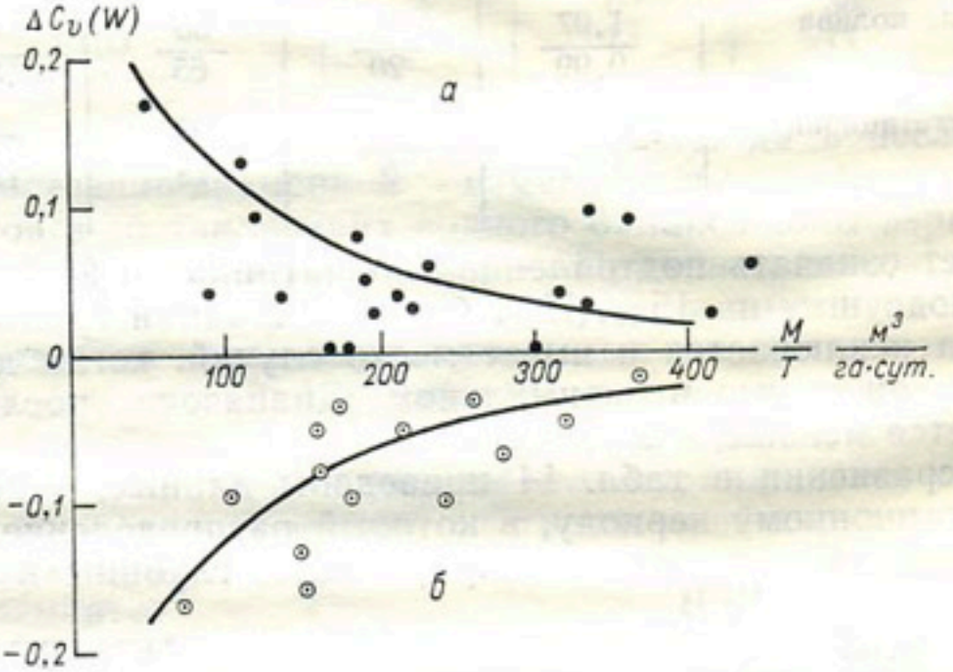


Рис. 17. Приращение неравномерности почвенного увлажнения за полив в зависимости от скорости водоподачи при близком (*а*) и глубоком (*б*) залегании УГВ.

возрастает до 0,20—0,25. При внутрипочвенном орошении норма около 1000 м³/га обеспечивает $C_v(W)$ на уровне 0,14 и 0,12 в первом и во втором полуметровых слоях почвы соответственно, а увеличение поливной нормы вдвое лишь незначительно увеличивает $C_v(W)$ (до 0,15). При ВПО наиболее стабильна влажность на глубине заложения трубок-увлажнителей ($C_v=0{,}06\div0{,}11$), а наибольшая пестрота на площади имеет место в дневном горизонте почвы ($C_v=0{,}15\div0{,}20$).

Если под эффективностью полива понимать ликвидацию дефицита влажности почвы на всей орошаемой площади, то с помощью кривых распределения можно получить исходные данные (табл. 14).

Как видно, при глубоком залегании УГВ, когда капиллярная кайма не выклинивается в корнеобитаемый слой почвы, ее влажность после полива в среднем по полю практически достигает верхнего предела оптимального увлажнения, но на самом деле

Таблица 14

Эффективность вегетационных поливов при орошении по бороздам при близком (числитель) и глубоком (знаменатель) залегании УГВ

Период	$\frac{W}{W_{НВ}}$	Доля площади (%) с влажностью в интервале		
		>НВ	НВ – ВРК	<ВРК
До полива	0,89 / 0,70	15 / 4	85 / 26	— / 70
После полива	1,07 / 0,99	45 / 20	55 / 65	— / 15
Невегетационный	0,82 / 0,76	10 / 5	90 / 78	— / 17

это может означать подтопление хлопчатника на 20% площади поля и подсушку на 15%. При близком стоянии грунтовых вод подсушка исключается и имеет место случай, когда доля площади с влажностью в оптимальном диапазоне после полива оказывается меньше, чем до него.

Для сравнения в табл. 14 приведены данные, относящиеся к невегетационному периоду, в который распределение влажности в основном зависит от микрорельефа, глубины и качества вспашки, а также УГВ.

При дождевании доля площади в интервале НВ—ВРК в среднем возрастает за полив с 45 до 55%, а на участке ВПО — с 60 до 95% применительно к слою почвы 0—100 см. Но при дождевании в наблюденном диапазоне глубин УГВ (3—4 м) значительная часть площади (30—40%) остается с влажностью ниже ВРК, а на участке ВПО площадь с такой влажностью до полива составляет около 40%, после полива она снижается до нуля.

Сравнительная характеристика различных способов орошения с точки зрения равномерности распределения влажности почвы по площади поля может быть оценена по данным, осредненным за весь период вегетации и относящимся к глубине УГВ 3—4 м (табл. 15).

На основании сказанного можно заключить, что при прочих равных условиях внутрипочвенное орошение хлопчатника обеспечивает наиболее эффективное пространственное распределение влажности в корнеобитаемом слое почвы, а орошение по бороздам — наименее эффективное.

Имеющиеся фактические данные позволяют применить аппарат корреляционных функций для оценки вариации влажности по площади хлопкового поля, орошаемого по бороздам, исходя из того, что закон распределения влагозапасов является нормальным [21, 253], что подтвердила и специальная проверка [180].

Таблица 15

Эффективность вегетационных поливов при различных способах орошения (среднее за период вегетации)

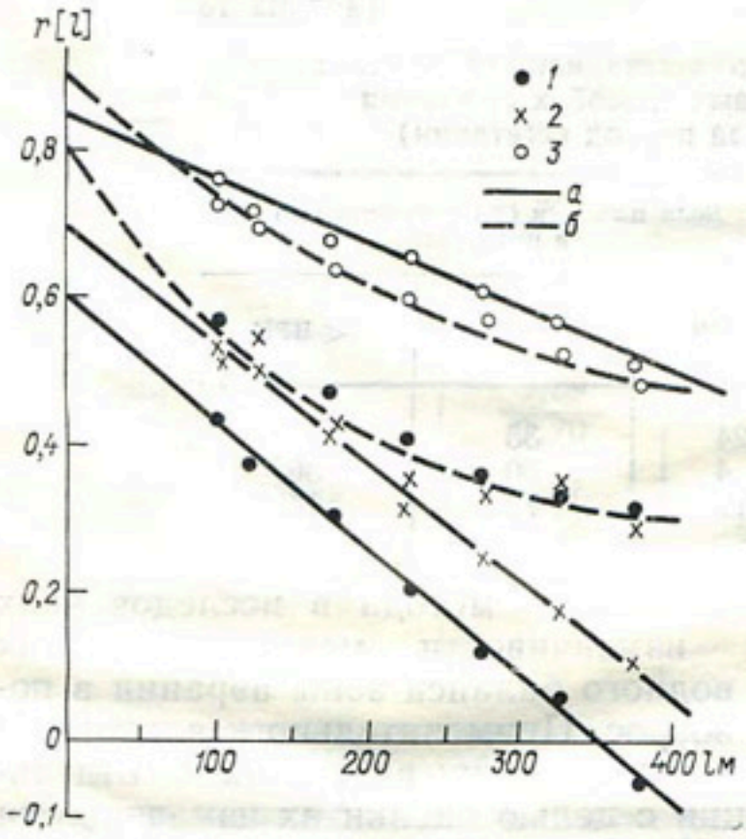
Способ орошения	Доля площади (%) с влажностью в интервале		
	> НВ	НВ – ВРК	< ВРК
По бороздам	24	33	43
Дождевание	4	60	36
ВПО	13	73	14

Интерес к использованию этого метода в исследованиях пространственно-временной изменчивости метеорологических элементов и составляющих водного баланса зоны аэрации в последнее время значительно возрос. Применительно к влажности почвы получены корреляционные функции влагозапасов отдельных горизонтов зоны аэрации с целью оценки их изменчивости как по площади [118, 122, 123], так и во времени [110, 174] в условиях естественного увлажнения. Установлено, что обоснованную оценку средних по площади величин влажности можно произвести лишь при известной статистической структуре ее поля, т. е. при наличии корреляционной или структурной функции этого элемента.

Вычисление корреляционных функций влажности орошаемой почвы под хлопчатником при глубоком залегании грунтовых вод производилось отдельно для периода вегетации и невегетационного периода, поскольку в указанные периоды роль факторов, в той или иной степени определяющих пространственную изменчивость влажности почвы, неоднозначна. В условиях близкого залегания УГВ, когда влажность слабо зависит от фона, подобное разделение нецелесообразно.

Как и предполагалось, корреляционные функции для различных по мощности слоев почвогрунта существенно различаются (рис. 18). Особенно это относится к слою почвы 0—300 см, где в результате значительного влияния капиллярной каймы грунтовых вод корреляционная функция убывает вдвое медленнее по сравнению со слоями 0—100 и 0—200 см. Столь же существенно разнятся расстояния, на которых корреляционные функции принимают нулевое значение. В период вегетации хлопчатника вид функций аналогичен построенным для глубин УГВ (см. рис. 8) и может быть аппроксимирован формулой (12).

Применительно к невегетационному периоду корреляционные функции для слоев почвы 0—100 и 0—200 см практически совпадают (рис. 18*б*), но убывают значительно медленнее, чем в период вегетации хлопчатника, т. е. вариация влажности в теплое



полугодие больше, чем в холодное, при той же глубине УГВ, и потому требуется различное число скважин для определения средних влагозапасов на заданной площади с той же равнообеспеченной погрешностью.

Рис. 18. Корреляционные функции влажности почвы при глубоком залегании УГВ в период вегетации хлопчатника (*а*) и в невегетационный период (*б*).

1 — слой почвы 0—100 см, *2* — то же 0—200 см, *3* — то же 0—300 см.

Корреляционные функции для невегетационного периода (рис. 18 *б*) аппроксимируются формулой

$$r(l)=r(0)\,e^{-al}, \qquad (33)$$

в которой приняты прежние обозначения, а различия в структурных параметрах функций видны из данных табл. 16.

Анализ корреляционных функций может быть выполнен по аналогии с тем, как это делал, например, О. Д. Сиротенко [223] для метеорологических параметров.

Таблица 16

Структурные параметры корреляционных функций влажности почвы при глубоком залегании УГВ

Параметр	Период вегетации			Невегетационный период		
	слой почвы (см)					
	0—100	0—200	0—300	0—100	0—200	0—300
$\overline{W}$ мм	182	421	683	186	444	730
σ мм	16,3	31,2	49,7	10,4	18,6	18,8
r (0)	0,606	0,696	0,830	0,809	0,809	0,910
l_0 м	215	278	658	390	390	850
a	$183 \cdot 10^{-2}$	$164 \cdot 10^{-2}$	$851 \cdot 10^{-3}$	$343 \cdot 10^{-2}$	$343 \cdot 10^{-2}$	$351 \cdot 10^{-2}$

Приведенный табличный и графический материал демонстрирует довольно низкие значения ординат корреляционных функций и радиусов корреляции, особенно в вегетационный период, что свидетельствует об отсутствии на хлопковых полях, орошаемых по бороздам, сколько-нибудь значительных по площади участков с высокой степенью синхронности колебания общих запасов влаги в почве.

В общем случае степень синхронности зависит от мощности рассматриваемого слоя почвы и времени года, но при глубоком залегании грунтовых вод значение причин, нарушающих синхронность, в большинстве случаев преобладает (табл. 17).

Таблица 17

Степень синхронности (%) изменения влагозапасов при глубоком залегании УГВ

Площадь (га)	Период вегетации			Невегетационный период		
	слой почвы (см)					
	0—100	0—200	0—300	0—100	0—200	0—300
0,5	21	33	58	36	36	59
1	17	27	55	30	30	52
3	7	14	43	18	18	38
5	3	8	38	14	14	34
10	0	3	30	10	10	26

Сказанное относится в первую очередь к запасам влаги в верхнем метровом слое почвы в период вегетации хлопчатника, где синхронность колебания влажности даже на площади 0,5 га едва превышает 20%, а при увеличении площади до 10 га принимает нулевое значение. Характерно, что и при глубоком залегании УГВ проявляется влияние капиллярной каймы, сглаживающей пестроту распределения влагозапасов. Об этом говорит тот факт, что степень синхронности изменения запасов влаги в слое почвы 0—300 см в вегетационный и невегетационный периоды одинакова (табл. 17).

Согласно рис. 18*а*, в пределах окружности диаметром 50 м средний коэффициент корреляции между рядами влажностей для любой пары скважин в пределах выбранной площади превысит лишь 0,54, 0,63 и 0,79 для слоев почвы 0—100, 0—200 и 0—300 см соответственно. Если же диаметр окружности увеличить до 150 м, то запасы влаги для любых двух произвольно выбранных внутри окружности скважин будут отвечать коэффициентам корреляции 0,34, 0,46 и 0,71. В невегетационный период радиус корреляции в среднем на 40%, а параметр $r(0)$ в среднем на 20% выше, чем в период вегетации. Следовательно,

коэффициент корреляции между запасами влаги для любой пары скважин на той же площади в первом случае окажется выше, чем во втором. Например, на площади около 2 га (окружность диаметром 150 м) коэффициенты корреляции послойных запасов влаги пары скважин превысят 0,48 для слоев 0—100 и 0—200 см и 0,68 для слоя почвы 0—300 см.

Воспользовавшись формулой (13), определим погрешность экстраполяции влагозапасов на различные расстояния. Подсчет показывает, что в период вегетации запасы влаги в слое почвы 0—300 см экстраполируются на расстояние 100 м со средней квадратической погрешностью 33 мм, а в невегетационный период погрешность составляет всего около 13 мм. Если же расстояние экстраполяции увеличить до 300 м, то погрешность для того же слоя возрастает до 42 мм в вегетационный период и до 16 мм в невегетационный. Для слоев почвогрунта малой мощности, особенно в теплое полугодие, а также при больших расстояниях экстраполяции ординаты корреляционных функций столь малы, что без особого ущерба для точности расчетов погрешность экстраполяции можно допустить равной среднему квадратическому отклонению точечных значений влагозапасов.

На основании известной статической структуры поля влажности почвы можно оценить точность определения средних на заданной площади влагозапасов в данном слое почвогрунта с помощью зависимостей (14). Согласно результатам вычислений (табл. 18), с увеличением числа скважин на одной и той же площади погрешность определения средних запасов влаги уменьшается, но начиная с $n=20$ требуется значительный рост числа скважин для существенного уменьшения погрешности.

Из данных табл. 18 следует, что по двум скважинам на площади, например, 5 га средние запасы влаги в слое почвы 0—100 см определяются в период вегетации с погрешностью 25,4%. Если увеличить число скважин на той же площади до 10, то погрешность снизится до 7,6%. С увеличением мощности слоя почвогрунта, в котором необходимо определить средние запасы влаги, погрешность прогрессивно уменьшается и, следовательно, число скважин может быть сокращено.

Ординаты корреляционных функций при близком залегании УГВ достаточно высоки (табл. 19), чтобы обеспечить синхронность колебания влагозапасов на высоком уровне. Если почвенно-гидрологический режим произрастания хлопчатника охарактеризовать в первом приближении запасами влаги в верхнем метровом слое почвы, то можно утверждать, что эта величина изменяется с синхронностью около 76% для площадей порядка $^1/_4$ га (окружность диаметром 60 м). Влияние причин, нарушающих синхронность, в этом случае имеет подчиненное значение, величина их не превышает 24%. При увеличении площади вдвое степень синхронности уменьшается до 71% при 29% причин, нарушающих синхронность.

Таблица 18

Относительная погрешность (%) определения средних по площади запасов влаги различных слоев почвы при глубоком залегании грунтовых вод

Площадь (га)	Число скважин	Вегетационный период			Невегетационный период		
		слой почвы (см)					
		0—100	0—200	0—300	0—100	0—200	0—300
0,5	2	8,4	6,7	4,9	1,8	1,4	0,6
	5	4,7	3,5	2,6	1,1	0,8	0,4
	10	2,9	2,2	1,6	0,8	0,6	0,3
	20	1,4	1,4	1,0	0,5	0,4	0,2
	30	1,1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1
1	2	11,9	9,1	6,6	1,9	1,4	0,6
	5	6,2	4,7	2,3	1,2	0,9	0,4
	10	3,8	2,9	2,1	0,8	0,6	0,3
	20	2,3	1,8	1,3	0,5	0,4	0,2
	30	1,4	0,9	0,7	0,4	0,3	0,1
3	2	19,9	15,2	10,8	2,0	1,5	0,6
	5	9,9	7,7	5,6	1,2	0,9	0,4
	10	6,0	4,6	3,4	0,8	0,6	0,3
	20	3,6	2,8	2,0	0,6	0,4	0,2
	50	1,9	1,4	0,9	0,4	0,3	0,1
5	2	25,4	19,9	14,2	2,0	1,5	0,6
	5	12,8	9,8	7,1	1,2	0,9	0,4
	10	7,6	4,7	4,3	0,8	0,6	0,3
	20	4,5	3,5	2,6	0,6	0,4	0,2
	50	2,2	1,8	1,3	0,4	0,3	0,1
10	2	35,7	27,5	19,9	2,1	1,6	0,7
	5	17,9	13,8	10,0	1,3	0,9	0,4
	10	10,5	8,2	5,9	0,9	0,6	0,3
	20	6,4	4,9	3,5	0,6	0,4	0,2
	50	3,2	2,5	1,8	0,4	0,3	0,1
50	2	79,6	61,2	44,4	2,6	1,9	0,8
	5	40,0	30,6	22,2	1,5	1,1	0,5
	10	23,6	18,3	13,2	0,9	0,7	0,3
	20	13,8	10,8	7,9	0,6	0,5	0,2
	50	7,0	5,4	4,0	0,4	0,3	0,1

Таблица 19

Ординаты корреляционной функции влажности почвы при близком залегании УГВ

Слой почвы (см)	Расстояние (м)				
	30	60	90	120	150
0—50	0,893	0,850	0,806	0,764	0,721
0—100	0,911	0,875	0,841	0,806	0,758

Однако и при близком залегании грунтовых вод параметр $r(0)$, которым аппроксимируется значение корреляционной функции при $l=0$, существенно отличается от единицы, составляя 0,936 и 0,945 для слоев почвы 0—50 и 0—100 см соответственно, в чем проявляется наличие случайных ошибок в данных наблюдений.

При близком стоянии грунтовых вод пространственная изменчивость столь мала, что позволяет обойтись минимумом наблюдательных скважин.

Глава 4

РЕЖИМ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ

Стадийность процесса испарения почвенной влаги, установленная в начале века П. С. Коссовичем, вплоть до настоящего времени служит теоретической основой при установлении зависимости величины испарения от определяющих его факторов.

Первая стадия соответствует увлажнению почвы до верхнего оптимального предела (НВ), когда скорость испарения является максимальной и зависит главным образом от метеорологических условий, радиационных свойств и шероховатости подстилающей поверхности. При уменьшении влажности почвы и снижении ее влагопроводности наступает вторая стадия испарения, при которой скорость последнего падает пропорционально убыванию запасов влаги. Принято считать, что эта стадия имеет место в интервале влажности почвы НВ—ВРК. Третья стадия наступает при переходе влажности почвы через ВРК, когда прекращается передвижение влаги к плоскости испарения в жидком виде и начинается физическое иссушение почвенной толщи.

Понятно, что в условиях правильно организованного орошения третья стадия отсутствует, а первая стадия, соответствующая потенциальному испарению (испаряемости), весьма кратковременна. Следовательно, основное количество воды орошаемое поле расходует в период второй стадии, а сама величина испарения изменяется в пределах от испаряемости до 40—50% от нее.

1. Испаряемость

Обычно под испаряемостью понимают максимально возможное при данных метеорологических условиях испарение с подстилающей поверхности, влагозапасы которой неограничены. Из этой формулировки следует, что величина испаряемости E_0 определяется главным образом способностью приземного слоя воздуха поглощать водяной пар, т. е. является свойством воздуха.

Во многих случаях именно указанным обстоятельством аргументируют те исследователи, которые характеризуют E_0 величиной испарения с водной поверхности [14, 92, 256, 275]. По данным А. Р. Константинова [119], испарение с водной поверхности неглубоких (до 2 м) водоемов близко к испарению

с оптимально увлажненных почв под сельскохозяйственными культурами, но для глубоких водоемов, способных аккумулировать часть тепла в одни периоды и отдавать его в другие, возможны сезонные смещения максимума испарения.

Помимо глубины водоема, на испарение с его поверхности оказывают существенное влияние и линейные размеры, что в равной степени относится и к оптимально увлажненной почве. Если, например, испаряемость на расстоянии 10 км от наветренного края орошаемого поля принять за 100%, то та же величина на расстоянии 100 м составит 112%, а на расстоянии 10 м уже 130% [40], т. е. чем меньше размер увлажненной поверхности, тем больше проявляется адвекция тепла с окружающей территории. Те же данные, перестроенные А. Р. Константиновым [117] в зависимость испаряемости от площади увлажненного участка, показали, что интенсивность испарения (и испаряемости) с площади 1000 км² меньше соответствующей величины с площади 100 км² на 7%, с площади 1 км² — на 15%, с 1 га — на 22% и с 20 м² (площадь испарительного бассейна) — на 30—35%.

Влияние адвекции чрезвычайно осложняет экспериментальное определение испаряемости. Существующие приборы, анализ работы которых и описание можно найти в [63, 93, 117, 120], несовершенны и не получили широкого применения, что отчасти объясняется субъективным подходом к выбору того или иного вида подстилающей поверхности, ее размера и способа установки прибора. Поэтому можно считать, что в настоящее время наблюдения за испаряемостью с различных подстилающих поверхностей, за исключением водной, не ведутся.

Сделав вывод о невозможности использования величин испарения с водной поверхности для характеристики испаряемости с сельскохозяйственного поля, А. Р. Константинов [116] как альтернативу водной поверхности предлагает в качестве стандарта оптимально увлажненный луг, подчеркивая, что ход зависимости интенсивности испарения с луга от влагозапасов почвы подобен ходу аналогичной зависимости для большинства сельскохозяйственных культур. По мнению С. И. Харченко [246], испаряемость на оптимально увлажненном луге по величине и по ходу во времени совершенно не соответствует испаряемости с технических и пропашных культур, что существенно ограничивает применение метода А. Р. Константинова.

Имеются предложения установить растительный покров люцерны в качестве стандартной поверхности при определении потенциального водопотребления сельскохозяйственных культур [31, 273],

Если обратиться к энергетической трактовке испаряемости, впервые предложенной М. И. Будыко [36, 38], то можно заключить, что испаряемость с обширной увлажненной поверхности определяется количеством тепла, которое может израсходовать

на испарение данная подстилающая поверхность в единицу времени.

Различия в радиационных свойствах подстилающих поверхностей обусловливают различия и в суммах испаряемости даже при неизменных метеорологических условиях, но, поскольку эти различия обычно не превосходят 5% [68, 119], принято считать испаряемость для большинства сельскохозяйственных культур одинаковой при равной продолжительности вегетационного периода.

Важная роль испаряемости в решении ряда гидрометеорологических и мелиоративных задач, а также отсутствие экспериментальных данных обусловили разработку значительного количества расчетных методов. В некоторых из них испаряемость принимается пропорциональной дефициту влажности воздуха [14, 90, 131, 214], в других [217] — его температуре.

Как показали материалы полевых исследований, а также выводы из теоретического анализа [40], испарение в условиях искусственного орошения, пропорциональное дефициту влажности, рассчитанному по температуре поверхности, мало связано с той же величиной, определенной по температуре воздуха. А поскольку температура увлажненной поверхности может быть ниже температуры воздуха, использование дефицита влажности при расчетах испаряемости приводит к систематически завышенным результатам. Поэтому Л. А. Молчанов [160] при построении карты испаряемости для территории Средней Азии ввел в формулу Н. Н. Иванова [92] понижающий коэффициент 0,8, после чего эта формула, получившая широкое распространение, в частности в институте Средазгипроводхлопок, записывается в виде

$$E_0 = 0{,}00144\,(t+25)^2\,(100-r), \qquad (34)$$

где t и r — средние месячные значения температуры и относительной влажности воздуха.

С. И. Харченко [246] преобразовывает уравнение теплового баланса для определения испаряемости, записывая его в виде

$$E_0 = \frac{R_0 - B_0}{L}\,\frac{\Delta e_0}{\Delta e_0 + 0{,}64\,\Delta t_0}, \qquad (35)$$

где R_0 и B_0 — соответственно радиационный баланс и поток тепла в почву при увлажненной ее поверхности, L — скрытая теплота испарения, Δt_0 и Δe_0 — градиенты температуры и абсолютной влажности при $E = E_0$. Второй множитель уравнения (35) представляет собой адвективный фактор, которым можно пренебречь при расчете испаряемости применительно к обширным территориям.

При расчете норм испаряемости, когда поток тепла в почву и турбулентный поток тепла в атмосферу уравновешиваются, может быть использовано упрощенное уравнение [38]

$$E_0 = R_0/L. \qquad (36)$$

Использование уравнения (36) в практических целях осложняется отсутствием систематических наблюдений за величиной R_0, в связи с чем представляют интерес методы ее расчета. А. П. Вершинин [47], например, понимающий под испаряемостью величину фактического испарения, увеличенного за счет дополнительных притоков радиационного тепла и потока в почву над увлажненной территорией, предлагает уравнение вида

$$R_0 = Q(A - A_0) + R,$$

где Q — суммарная радиация, A и A_0 — альбедо неувлажненной и увлажненной поверхностей, R — радиационный баланс.

Сравнивая суммы радиационного баланса орошаемых и неорошаемых участков, С. И. Харченко [246] пришел к выводу, что $R_0 > R$ в среднем на 10%. По другим данным [11, 106, 164, 205], это превышение в отдельных случаях может составлять 20 и даже 30%.

В то же время Ф. Ф. Давитая и Ю. С. Мельник [68] констатировали хорошее совпадение величин R и R_0, что послужило основой для последующих расчетов радиационного баланса по его связи с суммой температур воздуха выше 10°С. Весьма обстоятельная сводка таких методов приведена в работе [154].

Известно, что сеть актинометрических станций все еще редка, а на всей территории новой зоны орошения в Голодной и Каршинской степях таких станций вовсе нет, и потому даже при известной поправке на орошение определить суммы радиационного баланса затруднительно. К тому же соотношение R на орошаемых и неорошаемых участках меняется во времени и во многом зависит от свойств сравниваемых поверхностей.

Более обоснованными представляются рекомендации определять R_0 по суммарной солнечной радиации Q из соотношения

$$R_0 = \omega Q,$$

где ω, по данным [246], для пшеницы, кукурузы и других сельскохозяйственных культур составляет в среднем 0,63. По данным [157], в фазу цветения хлопчатника, когда на суммарное испарение затрачивается 80—100% радиационного баланса, $\omega = 0{,}62 \div 0{,}86$.

Наши экспериментальные данные показали, что в среднем ω составляет примерно 0,61. Если принять эту величину и учесть, что $L = 60$ кал/г, то можно написать

$$E_0 = 0{,}013Q. \qquad (37)$$

Согласно уравнению (37), испаряемость при отсутствии адвекции может быть определена по суммарной солнечной радиации, отличающейся высокой стабильностью [27] и зависящей от широты места. В условиях Средней Азии самой величине испаряемости присуща высокая стабильность, при которой среднее отклонение от нормы не превышает 5%, а максимальное состав-

ляет 7—10% [222], т. е. находится в пределах точности расчетов по уравнению (36) [221].

В то же время структура уравнения (37) не позволяет учесть влияние мелиоративных мероприятий на суммы испаряемости. Например, посадка полезащитных лесных полос способствует уменьшению интенсивности турбулентного перемешивания и тем самым снижает испаряемость на 8—14% в зависимости от конструкции лесополосной клетки [40]. По мнению М. И. Будыко [39], средний ожидаемый эффект снижения испаряемости под влиянием полезащитных лесных полос составляет 10% и может быть учтен для небольших участков, орошение которых не влечет за собой существенных изменений влажности воздуха.

В. К. Гафуров [57] считает, что рост сельскохозяйственной освоенности в зоне Каракумского канала приведет к сокращению испаряемости на 10—15%.

Полагая, что при орошении и обводнении территории и в связи с нарастающей мощностью растительного покрова изменяется режим температуры и влажности воздуха, В. Р. Шредер с сотрудниками [262] для учета степени освоения территории подразделил осваиваемые земли на пять категорий от целины (1-я категория) до интенсивно освоенных и облесенных площадей (5-я категория). На основании статистической обработки результатов многолетних наблюдений 130 метеорологических станций, расположенных на землях различной категории освоения, была установлена закономерность, согласно которой средняя за период вегетации (апрель—сентябрь) относительная влажность воздуха зависит от категории освоения земель, изменяясь от 35% (1-я категория) до 50% (5-я категория). Позднее авторы сократили число категорий освоения до трех, сохранив рекомендацию использовать при расчетах испаряемости не фактические, а ожидаемые значения температуры и влажности воздуха, исходя из соотношений

$$t_1 = t + \Delta t; \quad \Delta t = 0{,}1\,(r - r_1), \tag{38}$$

где t_1 и r_1 — ожидаемые значения температуры и влажности воздуха по сравнению с фактическими t и r, Δt — поправка на категорию освоения.

Аналогичным образом могут быть вычислены и средние месячные значения относительной влажности воздуха по данным метеостанций, расположенных на целинных землях, удаленных от орошаемых массивов, и на территории оазисов.

Для учета категории освоения земель в расчетах испаряемости по формуле (36) воспользуемся зависимостью сумм радиационного баланса, приходящихся на градус температуры воздуха, от относительной влажности почвы [178]. Из этой зависимости в пределе $W = W_{\text{НВ}}$ имеем

$$R_0 - B_0 = xt,$$

где x — ордината указанной зависимости при оптимальном увлажнении почвы.

Полагая далее

$$x/L = \text{const} = x_0,$$

получаем

$$E_0 = nx_0t, \tag{39}$$

где n — число суток, t — средняя суточная температура воздуха, x_0 — коэффициент, определяемый экспериментально из синхронных наблюдений за радиационным балансом, температурой воздуха и влажностью почвы и равный для исследуемой территории в среднем 0,28.

С учетом поправки (38) уравнение (39) примет вид

$$E_0 = nx_0 [t + 0{,}1 (r - r_1)]. \tag{40}$$

Это уравнение учитывает метеорологические условия приземного слоя воздуха, радиационный баланс подстилающей поверхности и, хотя и косвенно, возможные изменения турбулентного влагообмена.

Из-за отсутствия экспериментальных данных по испаряемости проверка расчетных методов может производиться путем сравнения полученных результатов с суммами испарения, измеренными в первые дни после поливов или выпадения осадков, обеспечивающих увлажнение почвы до наименьшей влагоемкости. Обоснование этого метода дано в работе И. Г. Мушкина и В. К. Гафурова [166], которые, помимо указанных факторов, ставят испаряемость в зависимость от листового индекса хлопчатника, что в принципе позволяет рассчитывать водопотребление различных его сортов.

На рис. 19 приведена кривая распределения отклонений измеренных максимальных величин испарения (испаряемости) от рассчитанных по уравнению (39). Она свидетельствует об отсутствии систематических погрешностей расчета. Исключение составляют экспериментальные точки, соответствующие совхозу № 11 в Каршинской степи и целиком лежащие в области положительных отклонений. В период наблюдений этот совхоз имел всего около 400 га орошаемой площади, перемежаемой перелогами и окруженной со всех сторон целинными землями. В результате чего здесь особенно часто днем наблюдалась инверсия температуры, а затраты тепла на испарение превышали радиационный баланс в среднем на 10% (в отдельных случаях на 20—30%). Аналогичные результаты получены и другими исследователями [11, 205 и др.].

Для количественной оценки влияния сельскохозяйственного освоения территории произведен подсчет норм испаряемости по уравнению (40) (табл. 20).

Таблица 20

Месячные нормы испаряемости (мм) в Голодной и Каршинской степях по категориям освоения земель

Станция	Категория освоения	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV–IX
Совхоз № 5	1	111	180	229	239	224	177	1160
	2	105	173	225	228	211	171	1113
	3	98	167	217	221	198	164	1056
Карши	1	137	192	233	251	233	179	1225
	2	130	185	228	240	220	173	1176
	3	123	179	224	229	207	166	1128

Как видно, в целом за вегетацию в 3-ю категорию освоения (эксплуатационный период) испаряемость по сравнению с на-

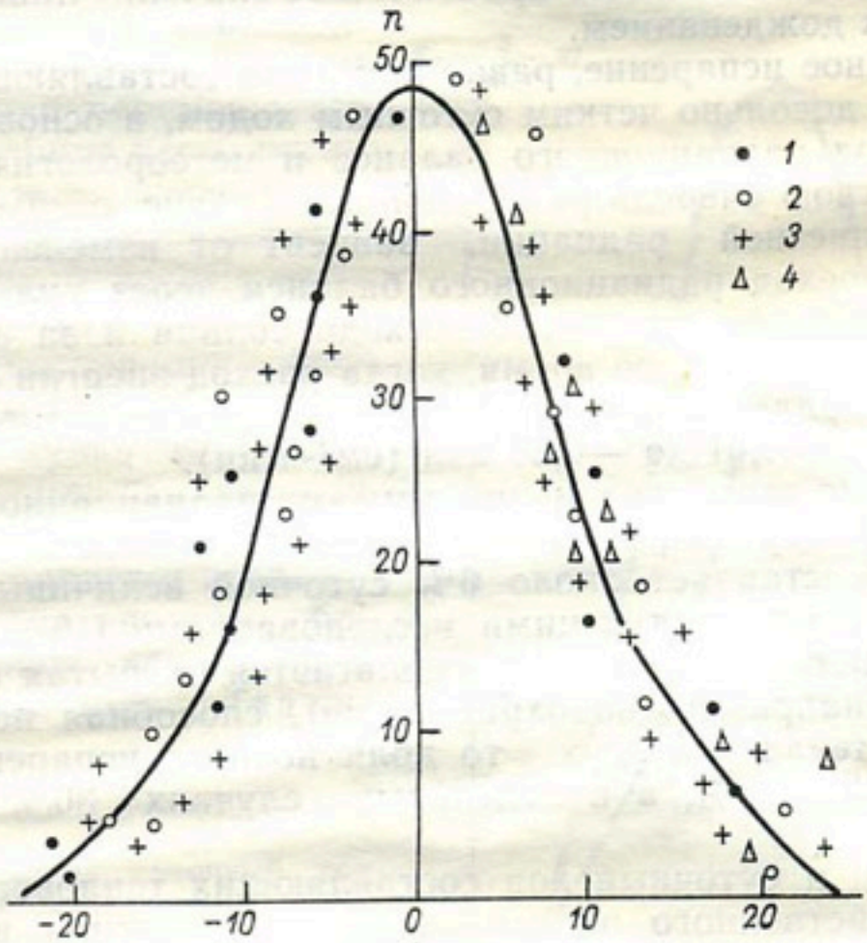


Рис. 19. Кривая распределения отклонений (%) измеренных сумм испаряемости от рассчитанных.

Голодная степь: *1* — совхоз № 18, *2* — совхоз № 1. Каршинская степь: *3* — колхоз «Москва», *4* — совхоз № 11.

чальным периодом снижается примерно на 10%, что хорошо согласуется с данными [39, 57].

Величины испаряемости, рассчитанные по уравнению (40), выше вычисленных В. К. Гафуровым [57] для территории

Туркмении, но применительно к 1-й категории освоения на 15% ниже получаемых по формуле (34). Если учесть зависимость испарения от площади испаряющей поверхности, предложенную А. Р. Константиновым [117] и цитированную выше, то окажется, что результаты расчетов по уравнениям (34) и (40) практически совпадают.

2. Суммарное испарение в период вегетации хлопчатника

Как известно, суммарное испарение слагается из физического испарения с поверхности почвы под растениями, транспирации и испарения дождевой влаги, перехваченной растительным покровом. Поскольку в летний период сумма осадков невелика, последняя величина имеет практическое значение лишь на полях, орошаемых дождеванием.

Суммарное испарение, равно как и его составляющие, характеризуется довольно четким суточным ходом, в основном повторяющим ход радиационного баланса и метеорологических элементов. В свою очередь радиационный баланс, следуя за ходом прямой солнечной радиации, зависит от изменения высоты солнца. Переход радиационного баланса через нуль наблюдается через 30—60 мин после восхода солнца и за 30—50 мин до его захода. В ночное время, когда расход энергии превышает ее приход, радиационный баланс становится отрицательным, изменяясь от —0,01 до —0,20 кал/(см^2 · мин).

В период с отрицательными суммами радиационного баланса суммарное испарение, по данным Б. Е. Милькиса и Г. А. Ахмедова [156], составляет около 6% суточной величины, что подтверждается и последующими исследованиями [157, 158]. Если вблизи орошаемого массива располагается открытая водная поверхность (например, водохранилище), способная ночью отдавать часть тепла в воздух, то доля ночного испарения может достигать 11—15%, а в отдельных случаях 30% суточной суммы [45].

Сезонный и суточный ход составляющих теплового баланса сельскохозяйственного поля в связи с орошением весьма подробно освещен в литературе [11, 45, 78, 106, 156, 164, 166, 205, 246, 252 и др.] и потому автор считает возможным ограничиться лишь приведением сводных данных (табл. 21).

На неорошаемых перелогах 40—60% радиационного баланса расходуется на турбулентный теплообмен, около 10% на теплопоток в почву и 30—50% затрачивается на испарение.

Важнейшим фактором жизнедеятельности растений, тесно связанным с их развитием и продуктивностью, является транспирация. Исследуя суточный ход транспирации растительным

Таблица 21

Суммарные величины составляющих теплового баланса за период от всходов хлопчатника до дефолиации (ккал/(га · 10^7))

Элемент	За день	За ночь	За сутки
Радиационный баланс	543	—52	491
Турбулентный теплообмен	—40	—17	—57
Поток тепла в почву	97	—70	27
Затраты тепла на испарение	486	35	521

покровом, А. М. Алексеев [12] показал, что при прочих равных условиях форма суточного хода зависит от влажности почвы. При достаточной влажности почвы имеет место одновершинная кривая, симметричная относительно 13—14 ч, а при недостаточной влажности в корнеобитаемом слое максимум транспирации перемещается на более ранние часы, после чего снижение интенсивности транспирации происходит быстрее. В ночные часы независимо от влажности почвы транспирация ничтожна и может быть приравнена к нулю. К аналогичному выводу пришли Н. А. Ахмедов и В. С. Коршунова [23] в процессе исследования энергетического баланса посевов хлопчатника в Гиссарской долине Таджикистана.

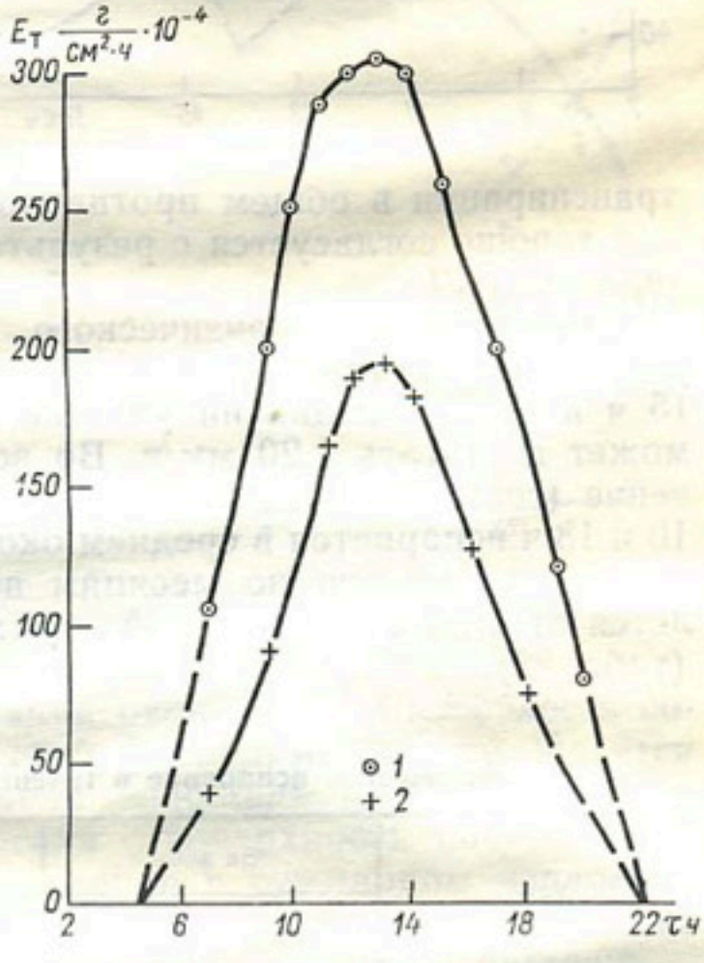


Рис. 20. Средний суточный ход транспирации хлопчатника в начале (*1*) и конце (*2*) межполивного интервала.

Экспериментальные данные (рис. 20) показывают, что интенсивность транспирации хлопчатника от нулевых значений в предутренние часы быстро возрастает, достигая максимума вскоре после полудня, после чего столь же быстро снижается до нулевых значений в среднем к 22 ч, причем этот ход сохраняется как в начале, так и в конце межполивного интервала. Расход воды

на транспирацию в период 10—14 ч составляет 30% суточной суммы, а в период 10—18 ч — около 70%.

Изменение транспирации по ярусам хлопчатника можно проследить на рис. 21, где представлены результаты эксперимента 24—29 августа 1973 г. на опытном участке в совхозе № 1 Голодной степи. Как видно, максимальные значения транспирации в утренние часы приурочены к среднему ярусу, а в жаркие послеполуденные часы — к верхнему. После 15 ч наибольшие значения транспирации имеют место в среднем и нижнем ярусах, а ход наименьших значений

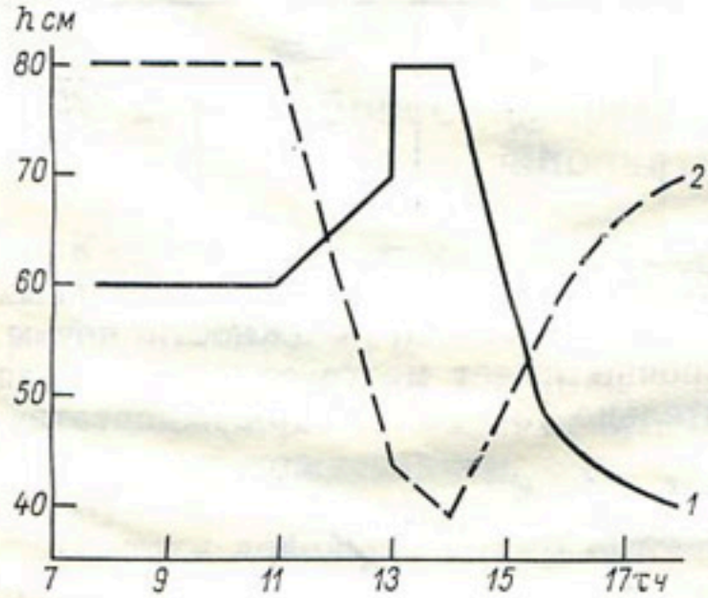


Рис. 21. Суточный ход максимальных (*1*) и минимальных (*2*) значений транспирации по высоте куста хлопчатника. 24—29 августа 1973 г.

транспирации в общем противоположен описанному. Подобный ход хорошо согласуется с результатами, опубликованными в литературе [67].

Суточный ход физического испарения аналогичен ходу транспирации. Максимум испарения наблюдается между 12 и 15 ч и после полива на участке с разреженным хлопчатником может достигать 1,20 мм/ч. Во всех случаях минимальное значение (сотые доли миллиметра) приходится на 22—4 ч. Между 10 и 18 ч испаряется в среднем около 80% суточной суммы. Доля ночного испарения по месяцам вегетационного периода колеблется от 4 до 8% суточной суммы при средней величине 6% (табл. 22).

Таблица 22

Физическое испарение в течение вегетационного периода

Месяц	За день		За ночь		За сутки	
	мм	%	мм	%	мм	%
Май	1,39	95,2	0,07	4,8	1,46	100
Июнь	1,81	93,4	0,13	6,6	1,94	100
Июль	1,50	92,5	0,12	7,5	1,62	100
Август	1,24	95,6	0,06	4,4	1,30	100
Сентябрь	1,17	96,0	0,05	4,0	1,22	100
Среднее	1,42	94,0	0,09	6,0	1,51	100

В начале межполивного интервала доля ночного испарения возрастает на 5—7%, достигая исходных значений к началу очередного полива, но, как указывает А. И. Будаговский [34], бóльшая часть этой влаги конденсируется на листьях хлопчатника и лишь незначительное ее количество поступает в атмосферу.

В течение периода вегетации (Голодная и Каршинская степи) заметно меняется структура суммарного испарения (рис. 22). В ранние фазы вегетации хлопчатника преобладает физическое испарение, составляющее в мае 84% суммарного, а в межфаз-

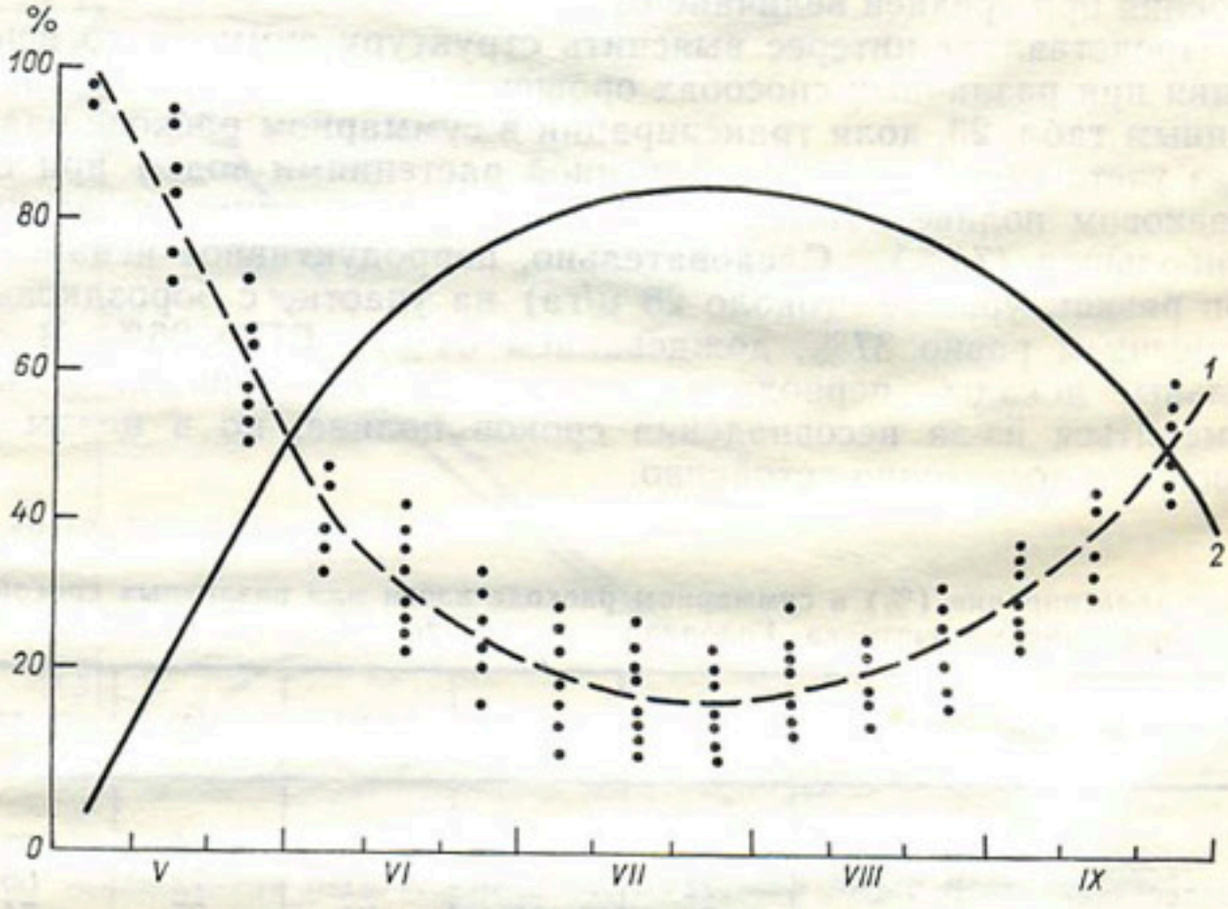


Рис. 22. Средний сезонный ход физического испарения (*1*) и транспирации (*2*) (% от суммарного испарения).

ный период всходы — бутонизация около 50%. Способность сообщества растений создавать свой фитоклимат сопровождается уменьшением доли незатененной площади и, как следствие, снижением физического испарения с поверхности почвы. С начала июня вплоть до конца вегетации в суммарном испарении преобладает транспирационный расход, максимальное значение которого (85%) приходится на межфазный период цветение — образование коробочек.

В среднем за период вегетации транспирационный расход $E_т$ составляет 63% суммарного, колеблясь в пределах 62—71%. По данным Ф. А. Муминова [164], в среднем за три сезона наблюдений транспирация хлопчатника составляет 51% суммарного испарения при двух поливах, 62% при шести и 63% при 7—10 поливах.

Для условий Туркмении И. Г. Мушкин и В. К. Гафуров [166] получили в среднем за 1967—1968 гг. $E_т$=62%, а для условий Ферганской долины, по данным Б. Е. Милькиса и Г. А. Ахмедова [156], $E_т$=72%.

В расчетах водопотребления хлопчатника С. Н. Рыжов [211] исходит из того, что транспирация за вегетационный период составляет в среднем 70% суммарного расхода.

Таким образом, при оптимальном режиме орошения хлопчатника его транспирация за сезон равна 62—72% суммарного испарения при средней величине 67%.

Представляет интерес выяснить структуру суммарного испарения при различных способах орошения хлопчатника. Согласно данным табл. 23, доля транспирации в суммарном расходе влаги (без учета испарения перехваченной растениями воды) при бороздковом поливе наименьшая (63%), а при внутрипочвенном наибольшая (74%). Следовательно, непродуктивное испарение при равном урожае (около 28 ц/га) на участке с бороздковым орошением равно 37%, дождеванием 34% и ВПО 26%. В отдельные декады периода вегетации это соотношение может изменяться из-за несовпадения сроков полива, но в целом за сезон оно достаточно устойчиво.

Таблица 23

Доля транспирации (%) в суммарном расходе влаги при различных способах орошения хлопчатника. Голодная степь, совхоз № 1, 1972—1974 гг.

Способ орошения	V	VI	VII	VIII	IX	V—IX
По бороздам	20	70	84	80	60	63
Дождевание	25	71	82	81	72	66
ВПО	36	78	88	91	75	74

При наибольшем удельном весе транспирации в суммарном расходе влаги участок с внутрипочвенным орошением одновременно характеризуется наименьшими общими потерями воды на испарение по сравнению с другими способами орошения. По сравнению с бороздковым орошением хлопковое поле, подвергнутое дождеванию (ДМ «Фрегат»), расходует на 6,2% меньше воды, а поле с ВПО на 10,5%.

По данным Г. Ю. Шейнкина [257], внутрипочвенное орошение обеспечивает снижение испарения на 13,5% по сравнению с бороздковым, но эта величина зависит от глубины, на которой размещается поданная в процессе полива вода. В свою очередь контур размещения воды в почве зависит от типа трубы-увлажнителя, ее водопроницаемости и впитывающей способности почв [54].

Важнейшим фактором, определяющим динамику суммарного испарения во времени, является полив. Из экспериментов Ф. А. Муминова [164] следует, что в начальные фазы развития хлопчатника, когда основной деятельной поверхностью поля является поверхность почвы, отдельный полив повышает испарение на 185—232%, но его влияние прослеживается лишь в течение нескольких дней. В высокие фазы вегетации растений влияние отдельного полива ослабевает, но в связи с увеличением

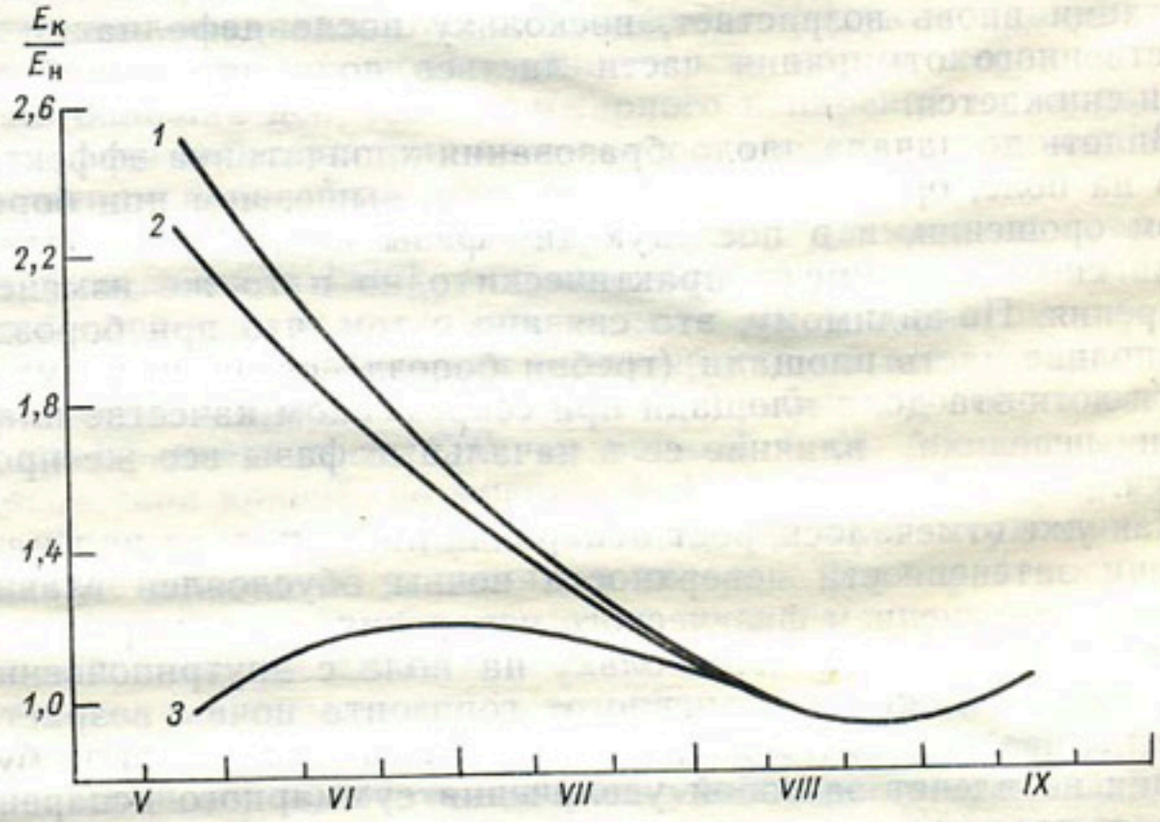


Рис. 23. Ход отношения суммарного испарения с хлопкового поля после полива $E_к$ к его величине до полива $E_н$ по месяцам вегетационного периода.

1 — дождевание, *2* — орошение по бороздам, *3* — внутрипочвенное орошение.

доли транспирации в суммарном расходе воды полем даже на 10-й день после полива исходные величины испарения не восстанавливаются. По мнению Е. Н. Минаевой [159], в этот период вообще не наступает резкого изменения в соотношениях элементов теплового баланса, а А. Джалилов [70] зафиксировал депрессию суммарного испарения, наступившую в результате 4-го, 5-го и 6-го поливов хлопчатника.

На рис. 23 приведен средний ход отношения сумм испарения, зафиксированных до полива и после него при разных способах орошения. Как видно, наибольший эффект полива соответствует межфазному периоду всходы — бутонизация, когда при дождевании и бороздковом орошении хлопчатника испарение после полива возрастает в 2,3—2,5 раза. В этот период поливы проводятся при 15—35% затенения поверхности почвы, что вызывает значительный рост (на 25—40%) радиационного баланса

и соответственно снижение альбедо и эффективного излучения подстилающей поверхности. В дальнейшем, по мере увеличения интенсивности транспирации и росте затененной площади, снижается приращение радиационного баланса за полив и достигает всего 5—8% при 90% затененной площади. Соответственно снижается прибавка испарения за полив, а в межфазный период плодообразование — созревание вегетационные поливы независимо от способа подачи воды на поле могут обусловить снижение расхода влаги на суммарное испарение, который к концу вегетации вновь возрастает, поскольку после дефолиации или естественного отмирания части листьев доля затененной площади снижается.

Вплоть до начала плодообразования хлопчатника эффект полива на поле, орошаемом дождеванием, выше, чем при бороздковом орошении, а в последующие фазы поливы хлопчатника двумя способами имеют практически одно и то же изменение испарения. По-видимому, это связано с тем, что при бороздковом поливе часть площади (гребни борозд) остается несмоченной, и хотя эта доля площади при современном качестве планировки невелика, влияние ее в начальные фазы все же проявляется.

Как уже отмечалось, рост испарения после полива при малой степени затененности поверхности почвы обусловлен главным образом увеличением физического испарения, хотя и транспирация тоже возрастает. Поскольку на поле с внутрипочвенным орошением влажность дневного горизонта почвы возрастает после полива незначительно, полив хлопчатника в период бутонизации не влечет за собой увеличения суммарного испарения. Но и в последующие периоды вегетации эффект полива при внутрипочвенном орошении значительно слабее по сравнению с другими способами водоподачи (рис. 23).

Очевидно, что при равной испаряемости приращение суммарного испарения за полив будет тем больше, чем меньше исходная величина испарения. Поэтому в условиях близкого залегания грунтовых вод следует ожидать меньшего эффекта полива. И хотя количественную зависимость приращения суммарного расхода влаги от глубины УГВ установить не удалось, имеющиеся фактические данные позволяют констатировать, что при глубине УГВ 100—150 см приращение расхода влаги полем за время полива в фазу бутонизации в среднем на 25% ниже, чем при УГВ более 3 м.

В то же время при близких грунтовых водах депрессия суммарного испарения в высокие фазы вегетации хлопчатника встречается на 25% чаще, она глубже и сдвигается на более ранний срок. Помимо указанных выше причин, подобная депрессия является следствием подтопления корнеобитаемого слоя почвы, нередкого в условиях близкого стояния грунтовых вод и значительных поливных норм.

Затопление хлопчатника приводит к серьезным нарушениям его развития в любой фазе вегетации [87], хотя и по-разному [83], но во всех случаях имеет место снижение транспирации, а следовательно, и суммарного испарения.

Д. Торн и Х. Петерсон [232] снижение транспирации при повышенной влажности корнеобитаемого слоя почвы связывают с плохой аэрацией, при которой растения испытывают водный дефицит, аналогичный тому, как это бывает при подсушке хлопчатника. И. Макдермот [274] показал, что при плохой аэрации в растениях накапливаются токсические продукты анаэробного дыхания, снижающие водопроницаемость клеток корня.

Еще большая депрессия суммарного испарения наблюдается в результате запаздывания вегетационного полива, приводящего к иссушению корнеобитаемого слоя почвы.

Отношение испарения к испаряемости, называемое коэффициентом испарения [246], гидрометеорологическим показателем влагообеспеченности орошаемого поля [166], индексом стресса [270] и т. д., является важной характеристикой водообеспеченности растений в процессе вегетации. График хронологического хода коэффициентов $\alpha = E/E_0$, названный А. М. Алпатьевым [14] биологической кривой, по мнению А. И. Будаговского [34], упрощает обобщения материалов наблюдений при отсутствии или недостатке данных об условиях, в которых формировалось суммарное испарение. В общем случае по мере возрастания относительной площади листьев и смыкания растительного покрова коэффициент α повышается, а его снижение в конце вегетационного периода есть следствие дефолиации, а также общего старения растений, в результате которого уменьшается проницаемость протоплазмы, подвижность воды в растении [151], а следовательно, и транспирация.

Таблица 24

Средние коэффициенты испарения $\alpha = E/E_0$ при разных способах водоподачи

Способ водоподачи	Глубина УГВ (м)	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV–IX
По бороздам	1—2	0,69	0,66	0,78	0,79	0,76	0,70	0,73
	2—3	0,78	0,67	0,78	0,89	0,90	0,69	0,79
	3—4	0,64	0,57	0,65	0,84	0,83	0,72	0,71
	4—5	0,63	0,62	0,66	0,79	0,78	0,63	0,69
Дождевание	3—4	0,78	0,67	0,65	0,85	0,83	0,72	0,75
ВПО	2—3	0,78	0,67	0,74	0,76	0,74	0,65	0,72

Из табл. 24, в которой помещены коэффициенты испарения, вычисленные для месячного интервала времени, следует, что в апреле значение α во всех случаях выше, чем в мае. Это

объясняется влиянием влагозарядковых поливов, а также тем, что апрельская норма атмосферных осадков вдвое больше майской (43 мм против 21 мм).

Далее, начиная от фазы бутонизации хлопчатника и вплоть до раскрытия коробочек наблюдается рост коэффициентов испарения при различной глубине УГВ и способах водоподачи. Заметный спад имеет место лишь в сентябре.

Данные табл. 24 позволяют констатировать, что наиболее равномерным во времени испарением (по отношению к испаряемости) характеризуется внутрипочвенная система орошения хлопчатника, увеличивающая при прочих равных условиях долю транспирации в суммарном расходе влаги полем. Такой же амплитудой коэффициента α по месяцам периода вегетации (0,13) характеризуется и поле, орошаемое по бороздам, но при условии близкого (1—2 м) залегания грунтовых вод, обеспечивающих в течение всего сезона высокую влажность корнеобитаемых горизонтов зоны аэрации.

Применительно к месячному интервалу времени абсолютная величина коэффициентов испарения зависит не только от глубины УГВ и способа водоподачи, но во многом определяется сроками и нормами вегетационных поливов. Поэтому мы приводим табл. 25, в которой наблюденные суммы испарения за период вегетации представлены на фоне некоторых условий, в которых они формировались.

Данные табл. 25 обращают на себя внимание видимым отсутствием однозначной зависимости суммарного испарения от глубины залегания грунтовых вод. Наибольшая величина испарения (1082 мм) соответствует не только самому глубокому положению УГВ (более 15 м), но и самой высокой оросительной норме. В отличие от всех последующих, эта величина испарения получена методом водного баланса слоя почвы 0—400 см, причем, как показали расчеты [184], лишь 16% оросительной нормы было израсходовано на отток за пределы балансируемого слоя.

Если отвлечься от этой экстремальной величины, то можно отметить относительную стабильность сезонных сумм испарения в диапазоне глубин УГВ 1—5 м и оросительных норм 4,5—11 тыс. м³/га. Испарение колеблется в пределах 719—888 мм, а коэффициент вариации ряда составляет $0{,}09 \pm 0{,}01$ при среднем квадратическом отклонении около 75 мм.

Результаты, полученные другими исследователями, использовавшими метод теплового баланса в различных гидрогеологических и почвенно-мелиоративных условиях, в общем не выходят за указанные пределы. Так, по наблюдениям Б. Е. Милькиса и Г. А. Ахмедова [156], в Ферганской долине за период май—октябрь 1964 г. испарение составило 891 мм при глубине сильно минерализованных грунтовых вод 1—2 м. Г. А. Ахмедов с сотрудниками [22] зафиксировал в Ташкентской области сезонную сумму испарения за 1963 г. на участке дождевания (ДДА-100м)

Таблица 25

Суммарное испарение с хлопковых полей за период вегетации (IV—IX) при бороздковом орошении

Участок	Год	Глубина УГВ (м)	E мм	α	Оросительная норма (м³/га)	Схема полива
			Голодная степь			
Совхоз № 7	1966	>15	1082	0,86	13 000	1—2—1
Совхоз № 18	1967	4—5	750	0,71	10 184	1—1—1
	1968	3—4	719	0,67	6 178	1—1—1
Совхоз № 6	1968	2—3	813	0,77	5 815	1—1—1
Совхоз № 1	1971	2—3	850	0,80	7 860	1—1—2
	1972	2—3	888	0,84	5 500	0—2—1
	1973	2—3	802	0,76	4 840	1—1—1
	1974	2—3	833	0,78	5 420	0—2—1
	1975	2—3	790	0,79	5 600	1—1—1
			Каршинская степь			
Колхоз «Москва»	1970	1—2	868	0,77	11 290	1—3—1
	1971	1—2	824	0,73	4 579	1—1—1
	1972	2—3	876	0,78	4 569	0—1—1
	1973	1—2	787	0,70	5 055	1—1—1
	1974	1—2	777	0,69	8 284	1—2—1
	1975	1—2	735	0,68	6 820	1—1—1
Совхоз № 11	1971	>5	800	0,71	6 199	1—1—1
	1972	4—5	755	0,67	6 106	1—1—1
	1973	3—4	835	0,74	6 393	1—1—0

848 мм, а по наблюдениям Т. Нигманова в совхозе № 9 Каршинской степи (ДМ «Волжанка»), сумма испарения составила 816 мм. В среднем за 1960—1965 гг., по данным Ф. А. Муминова [164], для агрометстанции Бозсу сумма испарения составила 560 мм при схеме полива хлопчатника 0—2—0, 687 мм при схеме 1—4—1 и 781 мм при 7—10 поливах за сезон. В Гиссарской долине Таджикистана суммарное испарение равнялось 700—800 мм за сезон [70], а в Вахшской долине 760—908 мм [133].

В то же время С. И. Ваничкина [44] в голодностепском совхозе № 5 на почвах сульфатного и хлоридно-сульфатного засоления получила, что за период с 25 мая по 15 октября 1964 г. испарение составило 520 мм при урожае сырца около 6 ц/га и близком залегании УГВ (в среднем 1,3 м). В районе Ашхабада при глубоком (более 10 м) залегании грунтовых вод сезонная сумма испарения в 1967 г. оказалась равной всего 575 мм при оросительной норме 6624 м³/га, 23,5% которой приходились на влагозарядку, проведенную в начале апреля. В 1968 г. при приблизительно той же оросительной норме (6302 м³/га) и влагозарядке, проведенной в более ранние сроки (19—21 февраля), сезонная сумма испарения составила 680 мм, но урожай оказался ниже (20,8 ц/га против 23,5) [166].

К сожалению, большинство перечисленных авторов не приводит величин коэффициентов испарения, без которых сравнение абсолютных значений суммарного испарения, полученного в различных условиях, может носить субъективный характер вследствие возможных различий в суммах испаряемости.

Согласно данным табл. 25, коэффициенты испарения колеблются по годам и от участка к участку в довольно значительных пределах (0,69—0,86), проявляя тенденцию к уменьшению с ростом оросительной нормы при близком стоянии грунтовых вод и к увеличению при глубоком.

Большей надежностью обладает зависимость коэффициента испарения от глубины УГВ, характеризующаяся одновершин-

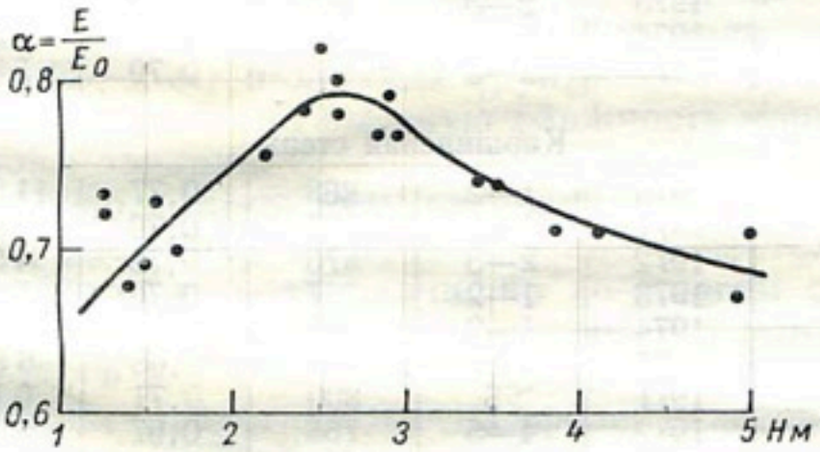


Рис. 24. Зависимость коэффициента испарения от глубины залегания грунтовых вод.

ной кривой с максимумом, соответствующим глубине УГВ 2,5 м (рис. 24). Из рис. 24 следует, что завышенные нормы водоподачи при близком стоянии УГВ обусловили значительные недостатки водопотребления хлопчатника, корневая система которого, располагаясь в верхних горизонтах почвы, не использовала влагу и питательные вещества более глубоких слоев. Рост недостатков водопотребления имеет место и при снижении грунтовых вод до глубины более 3 м от поверхности, а оптимальным можно считать интервал глубин 2—3 м (в среднем за вегетацию 2,5 м), при котором влажность и аэрация в корнеобитаемом слое почвы поддерживаются в оптимальном диапазоне. Таким образом, хотя и с иных позиций, подтверждается вывод, сделанный Г. Н. Павловым [170] и позднее И. П. Айдаровым и Э. К. Каримовым [10].

Распределение сезонной суммы испарения по месяцам вегетационного периода слабо зависит как от глубины УГВ, так и от способа водоподачи на поле (табл. 26). Как видно из табл. 26, испарение на хлопковых полях имеет закономерный внутрисезонный ход, нарастая от начала вегетации и снижаясь после максимума в период июль—август до значений, близких к ис-

ходным. За период с максимальным испарением (июль—август) расходуется около половины (44—49%) нормы водопотребления хлопчатника, а за три летних месяца 63—65% (на участке с ВПО 59%). По данным Л. П. Лапшовой [133], за период июль—август испаряется в среднем 45% сезонной суммы, а по данным Б. Е. Милькиса и Г. А. Ахмедова [156],— 43%.

Таблица 26

Нормы суммарного испарения с хлопкового поля по месяцам (% от суммы за период вегетации)

Способ водоподачи	Глубина УГВ (м)	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV—IX
По бороздам	1—2	8	13	19	25	21	14	100
	2—3	13	11	19	23	23	12	100
	3—4	10	12	19	23	21	15	100
	4—5	9	10	19	25	23	14	100
Дождевание	3—4	11	13	14	25	24	13	100
ВПО	2—3	12	15	15	22	20	16	100

Для надлежащего обоснования мелиоративных мероприятий на новоосваиваемых землях нередко появляется необходимость в количественной оценке потерь влаги на испарение перелогами, залежами и целинной поверхностью, удаленной от орошаемых массивов. По литературным данным известно, что перелоги, примыкающие к Южному Голодностепскому каналу, при глубине УГВ 2—4 м теряют на испарение за период апрель—сентябрь около 600 мм [155], а в Вахшской долине при глубине УГВ менее 1 м испарение с перелога составляет 82% (670 мм) суммарного испарения с хлопчатника и 27% (224 мм), если УГВ залегает глубже 3 м. По другим данным перелоги испаряют вдвое меньше, чем орошаемые хлопковые поля [250].

Водный режим зоны аэрации перелогов в большой степени определяется подтоком влаги со стороны окружающих орошаемых массивов, в связи с чем почва перелога, несмотря на отсутствие орошения, имеет повышенную влажность при различной глубине УГВ. Следовательно, испарение с перелогов оказывается выше, чем с аналогичной целинной поверхности, удаленной от орошаемых полей.

В активные фазы вегетации естественного травостоя на перелогах (апрель — первая декада мая) испарение с их поверхности может превышать расход влаги соседним хлопковым полем, но начиная с фазы бутонизации хлопчатника и до конца вегетационного периода имеет место обратное соотношение, величина которого характеризуется закономерным сезонным ходом (табл. 27).

Таблица 27

Суммарное испарение с хлопкового поля по месяцам периода вегетации (доли от испарения с перелога и залежи)

Поверхность	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Среднее за IV—IX
Перелог	0,92	1,10	1,54	1,65	1,76	1,32	1,38
Залежь	0,94	1,13	1,69	1,83	1,93	1,72	1,54

Отметим, что под перелогом УГВ в 1967 г. залегал на глубине 6,5—7,5 м, а в 1968 г.— на глубине 4—6 м, но под залежью весь период наблюдений (1970—1974 гг.) глубина грунтовых вод колебалась в пределах 1,5—2,5 м. Согласно данным табл. 27, суммарное испарение с поверхности, покрытой естественной растительностью, в апреле превышает испарение с занятого поля на 6—8%, а в мае хлопчатник лишь на 10—13% испаряет больше, чем перелог. Максимальное превышение расхода влаги хлопковым полем над испарением с перелога (залежи) приходится на июль—август и составляет 65—93% при среднем за период вегетации 38—54%.

Интенсивное подпитывание зоны аэрации перелога со стороны орошаемых массивов сглаживает влияние глубины УГВ на сезонную сумму испарения, в результате чего последняя относительно слабо изменяется от года к году (табл. 28).

Таблица 28

Сезонная сумма испарения с перелога (первые две строки), с залежи и ее распределение по месяцам периода вегетации

Год	Испарение за IV—IX (мм)	Распределение по месяцам (%)						Сумма за IV—IX (%)
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	
1967	508	16	17	18	20	16	13	100
1968	558	15	17	19	20	16	13	100
1970	514	14	15	18	19	20	14	100
1971	560	11	18	19	20	18	14	100
1972	511	12	18	20	20	16	14	100
1973	544	11	17	21	22	17	12	100
1974	528	12	14	19	20	18	17	100
1975	491	14	14	19	20	17	16	100

По той же причине испарение с естественной поверхности перелога более равномерно распределено по месяцам вегетационного периода, причем стабильность процентных соотношений и применительно к перелогу поддерживается на высоком уровне.

В силу наличия гидравлической связи между почвенно-грунтовыми водами перелога и занятого поля каждому подъему испарения с хлопчатника сопутствует рост испарения с перелога, хотя и с различным запаздыванием, обусловленным изменчивостью удаленности перелога от орошаемого в каждый конкретный полив

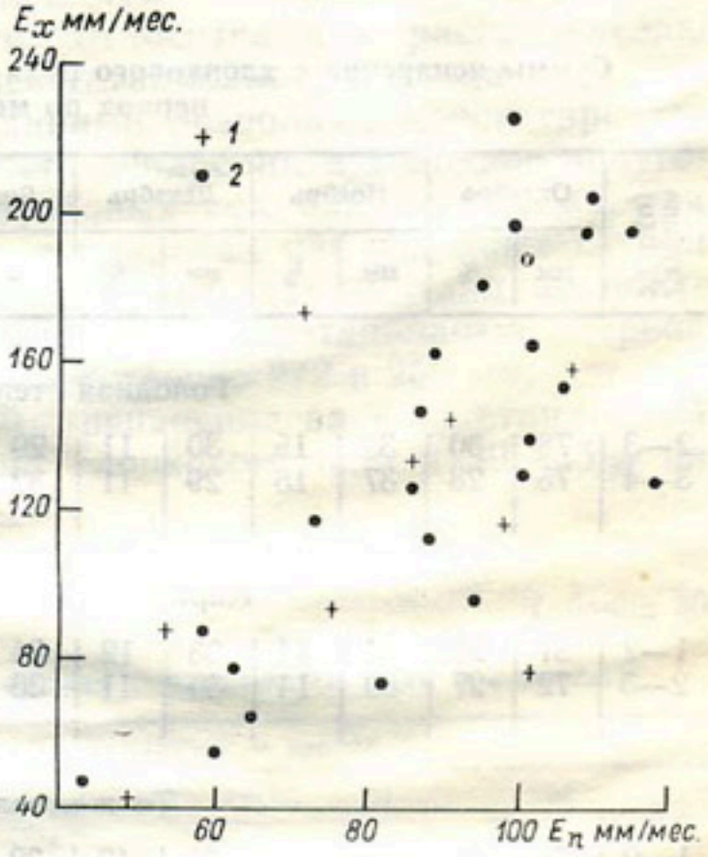


Рис. 25. Связь испарения с хлопкового поля E_x с испарением с перелога (*1*) и с залежи (*2*).

участка хлопкового поля. Все же связь испарения с различных подстилающих поверхностей прослеживается довольно четко (рис. 25).

3. Испарение в невегетационный период

В невегетационный период испарению уделяется, как правило, мало внимания отчасти из-за его малости, отчасти по причине трудностей организации измерений. В это время транспирация отсутствует и имеет место лишь физическое испарение с поверхности почвы. Влажность верхних горизонтов почвы поддерживается на уровне 0,7—0,9 НВ атмосферными осадками, количество которых в этот период составляет 70—80% годовой суммы.

Наибольшая интенсивность испарения (2,5—3,6 мм/сут) имеет место в октябре, когда после дефолиации у хлопчатника появляются молодые листья и доля транспирации в суммарном испарении может равняться сентябрьской или даже превышать ее. В этот период затраты тепла на испарение составляют 65—79% суммы радиационного баланса при месячной норме осадков около 20 мм, а суммарное испарение с учетом последних равно 70—80 мм против 50—60 мм на залежи (табл. 29). Поэтому октябрь является как бы промежуточным месяцем и в принципе может быть отнесен и к вегетационному периоду.

Таблица 29

Суммы испарения с хлопкового поля и с залежи в невегетационный период по месяцам

Глубина УГВ (м)	Октябрь		Ноябрь		Декабрь		Январь		Февраль		Март		Итого	
	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
Голодная степь, поле														
2—3	78	30	39	15	30	11	29	11	30	11	58	22	264	100
3—4	75	28	37	15	29	11	32	12	33	12	60	22	266	100
Каршинская степь, поле														
1—2	81	28	41	14	33	12	34	12	38	13	59	21	286	100
2—3	72	27	39	14	30	11	36	14	43	16	46	18	266	100
То же, залежь														
1—2	53	22	34	14	31	12	32	13	41	17	55	22	246	100
2—3	61	24	43	17	29	11	31	12	35	14	55	22	254	100

Уже в ноябре затраты тепла на испарение снижаются до 40—60% радиационного баланса, а месячная сумма испарения составляет 30—40 мм/мес., или 13—14% сезонной суммы. При длительном бездождном периоде, наиболее вероятном в период октябрь—ноябрь, интенсивность испарения снижается до 1,3—1,5 мм/сут., но даже небольшой дождь увеличивает испарение на 100% и более.

Столь же резко возрастает испарение после пахоты. Например, в 1968 г. опытное поле было вспахано отвальным способом в первой декаде декабря. При этом влажность слоя почвы 0—30 см поднялась на 75% площади поля с 0,69 НВ до 0,87 НВ и испарение возросло с 1,2 до 3,5 мм/сут., но уже в следующей декаде, когда подсох верхний слой, подстилаемый почвой, утратившей влагу в декаду, предшествующую пахоте, испарение снизилось до 0,4—0,6 мм/сут.

Значительный рост испарения начинается с марта в связи с увеличением радиационного баланса и интенсивным выпадением атмосферных осадков. За два месяца (октябрь и март) испаряется около половины (в среднем 49%) сезонной суммы.

В целом за невегетационный период залежь, сохранившая слабоволнистую поверхность, расходует на испарение в среднем на 8% меньше воды по сравнению с пашней, но максимальное отклонение, соответствующее октябрю, может достигать 35%. В остальные месяцы невегетационного периода испарение

с пашни практически не отличается от испарения с залежи. Сказанное в равной степени относится и к распределению сумм испарения по месяцам невегетационного периода.

Имеющиеся фактические данные позволяют констатировать чрезвычайно слабую зависимость испарения в холодное полугодие от глубины залегания грунтовых вод как на залежи, так и на пашне, по крайней мере в пределах наблюденных глубин УГВ (1—4 м). Поэтому можно осреднить данные табл. 29, получив при этом сумму испарения за невегетационный период с пашни и залежи, равную соответственно 272 и 250 мм.

Согласно данным табл. 30, испарение за невегетационный период составляет 23—26% на хлопковом поле и 30—35% на залежи от годовой суммы.

Таблица 30

Сезонные и годовая суммы испарения с хлопкового поля и с залежи

Год	Испарение за период					
	вегетации		невегетации		год	
	мм	%	мм	%	мм	%
Голодная степь, поле						
1967–68	750	75	256	25	1006	100
1971–72	850	75	281	25	1131	100
1972–73	888	77	268	23	1156	100
1973–74	802	76	255	24	1057	100
1974–75	833	77	247	23	1080	100
1975–76	790	74	281	26	1071	100
Среднее	820	75	265	25	1085	100
Каршинская степь, поле						
1970–71	868	75	288	25	1156	100
1971–72	824	77	253	23	1077	100
1972–73	876	76	278	24	1154	100
1973–74	787	74	281	26	1068	100
1974–75	777	75	264	25	1041	100
1975–76	735	73	270	27	1005	100
Среднее	812	75	273	25	1085	100
То же, залежь						
1970–71	514	68	245	32	759	100
1971–72	560	69	247	31	807	100
1972–73	511	65	275	35	786	100
1973–74	544	70	232	30	776	100
1974–75	528	72	207	28	735	100
1975–76	491	69	219	31	710	100
Среднее	525	69	238	31	763	100

4. Зависимость испарения от определяющих его факторов

Роль суммарного испарения в водном балансе сельскохозяйственных полей чрезвычайно велика. По существу транспирация растительностью и физическое испарение с поверхности почвы является основной, а нередко и единственной расходной статьей водного баланса зоны аэрации, характеризующей не только количество воды, необходимое для нормальной жизнедеятельности растений, но и объем минеральных веществ, идущих на их питание и рост. В условиях орошения размер суммарного испарения, наряду с биологическими особенностями сельскохозяйственных культур, определяет сроки водоподачи и поливные нормы, а наряду с ирригационной водоподачей, капиллярной каймой грунтовых вод и атмосферными осадками — продуктивные запасы влаги в почве.

Данные о суммарном испарении весьма малочисленны. Поэтому при оценке его величин для практических целей приходится использовать расчетные методы, основанные на анализе зависимости испарения от определяющих его факторов.

Влажность почвы оказывает влияние как на физическое испарение, так и транспирацию, но в первом случае основное значение имеет влажность верхнего горизонта почвы, тогда как во втором — запас влаги во всем корнеобитаемом слое.

При одной и той же влажности почвы интенсивность физического испарения будет тем больше, чем ниже затененность поверхности почвы, которая определяет приход прямой солнечной радиации. По данным М. П. Козлова [114], затенение вдвое снижает интенсивность испарения, причем независимо от способа, каким затенялся испаритель,— экраном или облачностью. Согласно наблюдениям Д. И. Бурова [42], поверхность парующей почвы теряет в полтора-два раза больше воды, чем поверхность, затененная растительностью. Коэффициент корреляции между испарением и затененностью почвы составляет 0,88—0,96 на хлопковом поле агрометстанции Бозсу [165].

Физическое испарение удовлетворительно описывается зависимостью, представленной на рис. 26 и обоснованной в [185].

Известно [34], что в некотором интервале влажности почвы ее уменьшение приводит к постепенному снижению транспирации, а при $W \leqslant ВЗ$ потеря влаги почвой практически равна нулю. Сама величина транспирации тесно связана с суммарным испарением (рис. 27), что отмечал и Ф. А. Муминов [164]. Согласно многочисленным исследованиям [14, 32, 33, 37, 38, 90, 240 и др], отношение испарения к испаряемости находится в линейной зависимости от влажности почвы. Эту зависимость можно записать в виде

$$E = E_0 W / W_{кр}, \qquad (41)$$

где $W_{кр}$ — некоторая критическая влажность, отражающая изменение условий испарения в разные фазы развития растительности. А. И. Будаговский [34] рекомендует определять $W_{кр}$ по

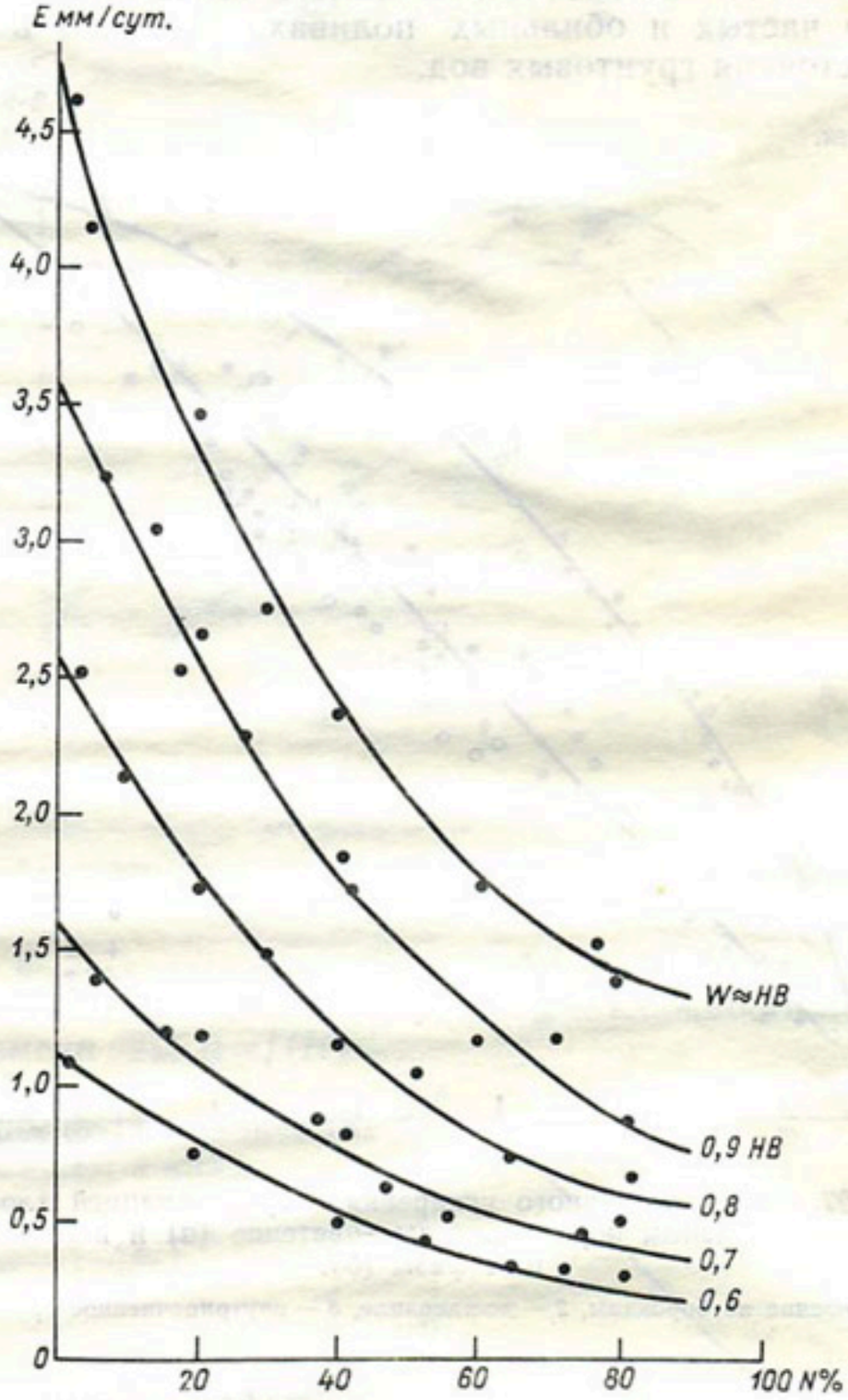


Рис. 26. Зависимость физического испарения от влажности почвы и ее затененности в истинный полдень.

точке перегиба на графике связи $E/E_0=f(W)$, полагая при этом постоянной скорость испарения при $W>W_{кр}$ [1].

[1] Предлагаемый метод определения $W_{кр}$ субъективен. В работе [246] аналогичную величину предлагается определять как разность между наименьшей влагоемкостью и влажностью завядания.— *Прим. ред.*

Вместе с тем имеющиеся фактические данные свидетельствуют о том, что затраты тепла на испарение в высокие фазы развития хлопчатника снижаются при превышении влажности почвы ее наименьшей влагоемкости (рис. 28). Это нередко имеет место при частых и обильных поливах, особенно в условиях близкого стояния грунтовых вод.

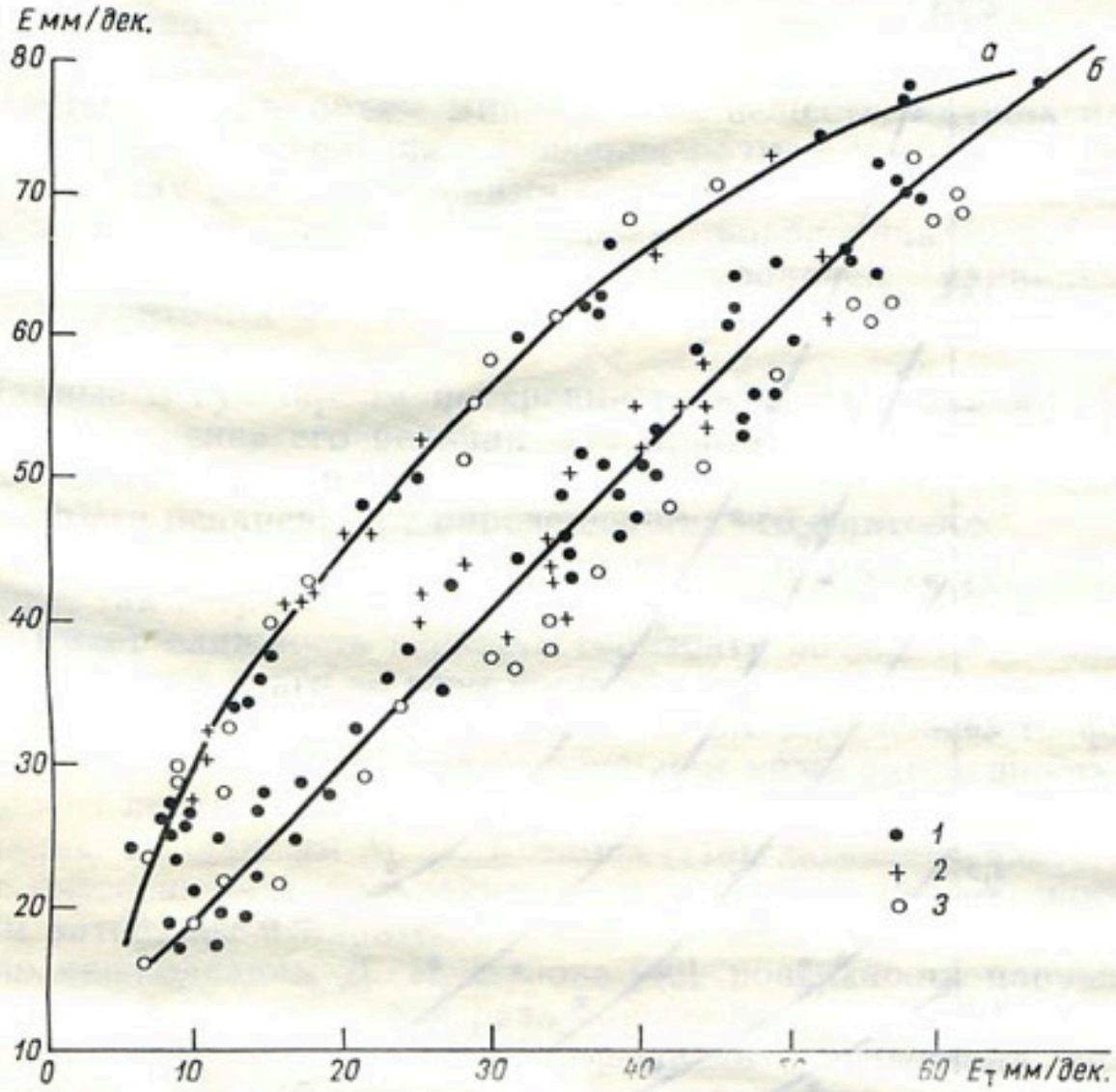


Рис. 27. Связь суммарного испарения с транспирацией хлопчатника в межфазный период всходы—цветение (*а*) и в последующие фазы (*б*).

1 — орошение по бороздам, *2* — дождевание, *3* — внутрипочвенное орошение.

Согласно уравнению (41), фактическая влажность почвы соответствует критической при $E=E_0$, но это равенство достигается уже при $W_{кр}=0{,}90$ НВ, а по данным И. Г. Мушкина и В. К. Гафурова [166] — при $W_{кр}=0{,}86$ НВ. Постоянная скорость испарения на уровне испаряемости имеет место лишь в диапазоне $W_{кр}—W_{НВ}$, а выше и ниже этого интервала $E<E_0$.

Анализ закономерностей изменения влажности почвы во времени и влияния влажности на суммарное испарение позволяет определять последнее и для коротких интервалов времени, на-

пример для межполивного интервала. С этой точки зрения наилучшим оказывается уравнение (25), которое можно переписать следующим образом:

$$W_к / W_н = (T_к / T_н)^{-\alpha}. \quad (42)$$

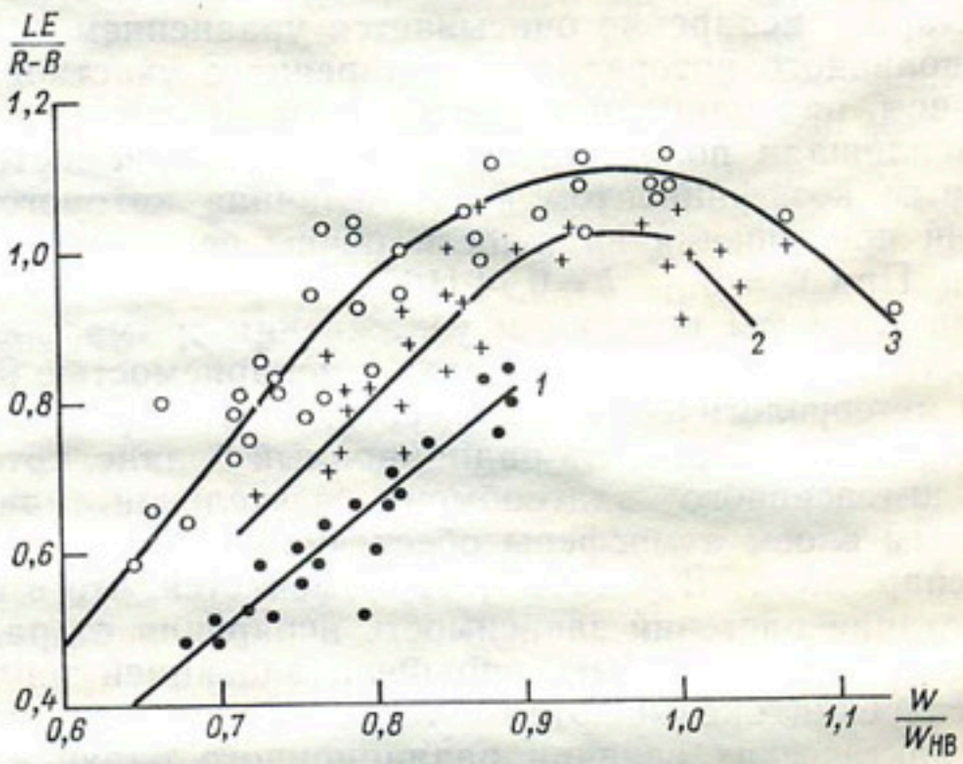


Рис. 28. Затраты тепла на испарение в зависимости от влажности почвы.

1 — всходы—бутонизация, *2* — бутонизация—цветение, *3* — цветение—созревание.

Здесь $W_н$ — влажность почвы, сформировавшаяся к концу полива и соответствующая дате $T_н$, $W_к$ — влажность почвы в момент времени $T_к$, $\alpha = f(H)$ (см. рис. 12).

С учетом (41) уравнение (42) перепишем в виде

$$\frac{E_{T_к}}{E_0} = \frac{W_н}{W_{НВ}} \left(\frac{T_к}{T_н} \right)^{-\alpha}, \quad (43)$$

где $T_к$ соответствует дате стока свободной гравитационной воды из верхних горизонтов зоны аэрации в конце полива. Продолжительность стока, сформировавшегося к концу полива, зависит от глубины УГВ (рис. 29).

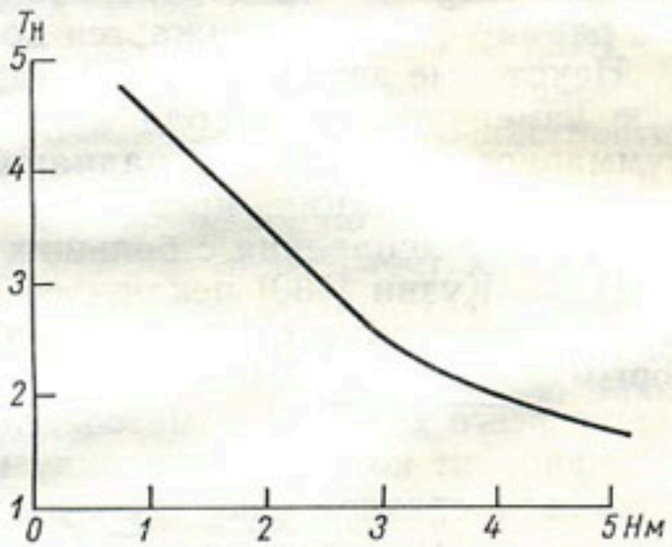


Рис. 29. Зависимость $T_н = f(H)$.

Проверка уравнения (43) на хлопковых полях, орошаемых по бороздам и дождеванием в диапазоне глубин УГВ 1—5 м, показала, что в 85% всех случаев погрешность оценки расчета испарения не превосходит 18% определяемой величины.

Применительно к участкам поля, еще не охваченным поливом, суммарное испарение описывается уравнением (43), как и для межполивного интервала, а испарение с участков, смоченных поливом, при наличии информации о распределении влажности по площади поля приравнивается испаряемости, взятой с некоторым коэффициентом $k<1$, величина которого зависит от степени превышения влажности почвы ее наименьшей влагоемкости. При $W=W_{\text{пв}}$ $k=0{,}74$ [166].

При достаточном почвенном увлажнении суммарное испарение находится в весьма тесной связи с испаряемостью [35], определяемой метеорологическими элементами. На первое место следует, по-видимому, поставить радиационный баланс, который при условии интенсивного влагообмена деятельной поверхности с приземным слоем атмосферы обеспечивает высокую корреляцию с испарением. В работе [119] отмечается, что в активные фазы вегетации растений зависимость испарения от радиационного баланса может быть нарушена адвекцией тепла, когда суммы испарения оказываются больше, чем это возможно, исходя из фактических величин радиационного баланса. Все же связи $E=f(R)$ применительно к месячным суммам характеризуются коэффициентом корреляции 0,79—0,87. Примерно такие же значения коэффициентов корреляции получены Ф. А. Муминовым [163] для суточных сумм испарения, дифференцированных по фазам развития хлопчатника. По данным Л. П. Лапшовой [133], наибольший коэффициент корреляции зависимости испарения от радиационного баланса (0,77—0,79) приходится на межфазный период плодообразование — созревание хлопчатника, а в ранние фазы он снижается до 0,50.

Некоторые авторы [59, 157, 158], используя относительно слабую изменчивость от года к году отношений затрат тепла на суммарное испарение к радиационному балансу и суммарной солнечной радиации, предлагают эти отношения для расчетов суммарного испарения с больших регионов.

П. С. Кузин [130] исключает возможность прямого влияния температуры воздуха на испарение, полагая температуру некоторым индексом, изменения которого пропорциональны изменению всего комплекса метеорологических условий. Между тем коэффициент корреляции между испарением и температурой составляет в среднем 0,83 [12], а в отдельные фазы вегетации хлопчатника повышается до 0,95 [133]. Согласно обобщающим данным К. Ли и Н. Мейнцера, приведенным в монографии Л. Тюрка [235], транспирация, а следовательно, и суммарное испарение на 60% зависит от температуры воздуха, на 35% от его влажности и лишь на 5% от скорости ветра над испаряющей поверхностью.

Вопрос о влиянии ветра на испарение и транспирацию изучен еще недостаточно. Очевидно, что в ветреную погоду ускоряется процесс диффузии водяного пара через устьица растений, обогащенный водяными парами воздух относится и в результате турбулентной структуры ветра заменяется более сухим. В. П. Попов [188] считает, что интенсивность испарения возрастает при усилении ветра до 2,5 м/с, после чего влияние ветра не проявляется. По Р. Э. Давиду [67], повышенная транспирация под влиянием ветра вне сомнений, но ее максимальная величина при прочих равных условиях наступает уже при незначительном ветре, причем устьичная транспирация значительно больше реагирует на изменение скорости ветрового потока. К противоположному выводу приходит А. М. Алексеев [12], отмечая, что ветер усиливает кутикулярную транспирацию, а на устьичную влияет мало.

Нельзя не учитывать и происхождение ветра. Например, при суховеях даже при высокой влажности почвы дефицит испарения может достичь такой величины, при которой растения повреждаются или даже гибнут [33], а ветер с озера или водохранилища снижает транспирацию [235].

Еще в 1938 г. П. С. Кузин [130] отмечал, что влияние ветра проявляется лишь постольку, поскольку он формирует над испаряющей поверхностью определенный дефицит влажности воздуха. Позднее к такому же выводу пришел А. А. Скворцов [224], подчеркнувший, что увеличение дефицита влажности воздуха составляет естественную поправку на ветер.

Все же при искусственно создаваемом равенстве прочих условий роль ветра проявляется довольно заметно. Например, в экспериментах П. Корсини [267] по мере снижения влажности почвы влияние скорости ветра на испарение превышало эффект суммарной солнечной радиации. В естественных условиях коэффициент корреляции между месячными суммами испарения и средней месячной скоростью ветра достигает $0{,}35 \pm 0{,}10$ [201].

Недостаточно изучена и зависимость суммарного испарения от факторов, характеризующих почвенные условия. В частности, в литературе немного данных о влиянии температуры почвы на испарение и транспирацию, что обусловлено, по-видимому, тем, что температура почвы связана прямой зависимостью с температурой воздуха и обратной с влажностью почвы, т. е. с факторами, влияние которых в разных условиях проявляется по-разному. К тому же изменение температуры почвы зачастую определяет не расход влаги в атмосферу, а передвижение ее в более глубокие горизонты [2, 69].

Действительно, коэффициент корреляции между температурой почвы на глубине 5 и 10 см и температурой воздуха достигает 0,90 [127], а между температурным градиентом (разница между температурой почвы и воздуха) и влажностью почвы 0,75—0,91 [215]. Поэтому выяснить влияние температуры почвы

можно лишь, исключив влияние других факторов. В этом отношении представляют интерес эксперименты П. Крамера [272], который показал, что интенсивность десукции находится в прямой зависимости от температуры почвы. При этом скорость транспирации теплолюбивых растений больше реагирует на изменение температуры почвы, чем холодостойких. Так, при охлаждении почвы под хлопчатником до 12°С его транспирация составляет лишь 7,4% транспирации хлопчатника, произрастающего в почве, нагретой до 25°С. Если же охладить почву до 4,2°С, то при прочих равных условиях транспирация составит всего 4,3% той же величины.

Влияние строения почвы на испарение изучалось С. И. Долговым [74] и А. Н. Урсуловым [237], получившим сходные результаты. Установлено, что при высокой влажности почвы крупные фракции испаряют воду более интенсивно, чем мелкие, что объясняется их хорошей воздухопроницаемостью. При недостаточной влажности почвы максимумом испарения характеризуются мелкие фракции благодаря большему капиллярному подтоку воды снизу. При равной влажности почвы крупные структурные агрегаты (2—3 мм) испаряют по сравнению с более мелкими фракциями в штиль меньше, а при ветре больше и притом в соответствии со скоростью ветра.

В условиях орошаемого земледелия особый интерес представляет выяснение зависимости суммарного испарения от минерализации почвенного раствора, количества внесенных удобрений и глубины залегания грунтовых вод. Поскольку упругость водяного пара и интенсивность капиллярного подъема при прочих равных условиях зависят от минерализации почвенного раствора, надо полагать, что пресные почвы испаряют влагу более интенсивно, чем засоленные. Об этом говорит и тот факт, что минимальная сезонная сумма испарения с хлопкового поля (520 мм) получена на засоленных землях при урожае хлопчатника около 6 ц/га [44]. Годовая сумма испарения с поверхности пухлого солончака объемным весом 0,76 в слое 0—10 см и общей порозностью 68% составляет, по данным И. П. Айдарова [8], лишь 235 мм, хотя УГВ залегает на глубине 1—2 м, и потому влажность почвы высока.

Депрессия суммарного испарения на засоленных почвах обусловлена главным образом угнетением растительного покрова и снижением транспирации. Т. Хилкама [271], промывая засоленные почвы, не обнаружил заметного роста физического испарения (при равных влажностях), но зато транспирация солянки при промывке почвы до относительно пресного состояния поднялась в среднем на 45%.

При прочих равных условиях транспирация будет тем выше, чем эффективнее используются удобрения, различные дозы и состав которых позволяют регулировать интенсивность транспирации [242]. Транспирация хлопчатника на различных почвах наи-

большая при удобрении NPK, причем по вариантам можно составить следующий ряд убывания транспирации [148]:

$$NPK < NP < N\frac{1}{3}PK < NK < \text{без удобрений}.$$

Для анализа связи испарения с определяющими его факторами и получения на ее основе региональных расчетных уравнений может быть использован метод множественной корреляции. В качестве основных факторов, определяющих декадные суммы испарения в период вегетации хлопчатника, приняты соответствующие декадные показатели: радиационный баланс R, глубина залегания УГВ H, запасы влаги в слое почвы 0—50 W_{0-50} и 0—100 см W_{0-100}, температура t, относительная влажность r и дефицит влажности воздуха d, скорость ветра v, а также суммарная солнечная радиация Q.

Расчеты выполнены на ЭВМ «Минск-22» по программе, предусматривающей получение парных коэффициентов корреляции, коэффициентов регрессии расчетного уравнения, а также статистического критерия для оценки надежности расчета. В качестве такого критерия принято отношение среднего квадратического отклонения ряда определяющих функцию аргументов S к среднему квадратическому отклонению ряда функции σ.

Согласно классификации, принятой в практике гидрологических прогнозов [19], метод считается приближенным при $S/\sigma > 0{,}8$, удовлетворительным при критерии 0,5—0,8 и хорошим, если $S/\sigma < 0{,}5$.

Таблица 31

Коэффициенты парной корреляции

	E	R	H	W_{0-50}	W_{0-100}	t	r	v	d	Q
E	1,00	0,64	—0,46	0,41	0,39	0,37	—0,29	0,34	0,11	0,32
R		1,00	—0,42	0,32	0,32	0,73	—0,46	—0,12	0,56	0,86
H			1,00	—0,47	—0,68	—0,33	0,27	0,23	—0,16	—0,19
W_{0-50}				1,00	0,91	—0,28	0,18	—0,27	—0,19	0,27
W_{0-100}					1,00	—0,23	0,24	—0,22	—0,22	0,32
t						1,00	—0,70	0,07	0,91	0,80
r							1,00	—0,06	—0,88	—0,70
v								1,00	0,21	0,32
d									1,00	0,75
Q										1,00

Анализ полученных данных (табл. 31) показывает, что суммарное испарение находится в прямой зависимости от радиационного баланса, влажности почвы, температуры воздуха, скорости ветра, суммарной солнечной радиации и в обратной зависимости от глубины УГВ и относительной влажности воздуха.

Наибольшей корреляцией отличается связь суммарного испарения с радиационным балансом, а наименьшей — с дефицитом влажности воздуха, который пропорционален испарению лишь в диапазоне малых и средних значений. Применительно к декадным интервалам в течение вегетации хлопчатника радиационный баланс описывает 41% дисперсии суммарного испарения, а глубина УГВ 21%.

Влагозапасы полуметрового и метрового слоев почвы примерно одинаково коррелируются с суммарным испарением, а из метеорологических факторов наибольшее значение имеет температура воздуха, коэффициент корреляции которой с испарением равен 0,37.

Величина и знак коэффициентов парной корреляции определяются степенью синхронности сезонного хода испарения и определяющих его факторов, равно как и хода одного фактора относительно другого. Так, коэффициентами корреляции выше 0,70 характеризуется связь между влагозапасами полуметрового и метрового слоев почвы, между суммарной солнечной радиацией, с одной стороны, и радиационным балансом, температурой воздуха и дефицитом его влажности — с другой, а также между относительной влажностью воздуха и дефицитом его влажности.

По мнению В. В. Рогоцкого [201], столь высокая корреляция не является случайной и определяется сезонным ходом гидрометеорологических элементов, в связи с чем на указанную связь можно опираться при построении различных прогностических зависимостей.

По результатам расчетов представляется возможным составить уравнение множественной регрессии в виде

$$E = E_0 [(1{,}4R - 17H - 86t - 423v - 2W_{0-100}) \cdot 10^4 + 0{,}89], \quad (44)$$

сводный коэффициент корреляции которого равен 0,88, остаточная дисперсия 0,23, а отношение $S/\sigma = 0{,}57$.

В уравнение (44) не включены аргументы W_{0-50}, r, d, Q, информация о динамике которых заложена в W_{0-100}, t, R соответственно и потому включение дополнительных аргументов не увеличивает сводный коэффициент корреляции.

Поскольку на вновь осваиваемых землях наблюдения за радиационным балансом пока не налажены, можно исключить из уравнения (44) радиационный баланс и одновременно аргумент W_{0-100} как имеющий сравнительно высокую корреляцию с глубиной УГВ. После этих упрощений уравнение (44) запишется в виде

$$E = E_0 [-(17H + 86t + 423v) \cdot 10^{-4} + 1{,}38]. \quad (45)$$

Уравнение (45) характеризуется сводным коэффициентом корреляции 0,79, остаточной дисперсией 0,38 и отношением $S/\sigma=0{,}67$.

При вычислении коэффициентов парной корреляции и регрессии объем использованной выборки составил 110 декад. Проверка уравнений множественной регрессии на независимом фактическом материале (объем проверочной выборки 30 декад) показал, что в 43% всех случаев погрешность расчета суммарного испарения по уравнению (44) не выходит за пределы ±10%, в 80% случаев — за пределы ±20% и в 97% случаев — за пределы ±30%. Применительно к уравнению (45) в те же пределы укладываются соответственно 30, 68 и 90% объема проверочной выборки (рис. 30). Проверка показала также отсутствие систематических погрешностей расчета, за исключением первых декад после полива хлопчатника, когда вычисленные суммы испарения в среднем на 10% ниже измеренных. Для этих декад, по-видимому, более целесообразно использовать уравнение (43), не имеющее систематических погрешностей в этот период.

Метод многофакторного регрессионного анализа может быть применен и для холодного полугодия [61], но и в этом случае для того, чтобы получаемая этим методом статистическая зависимость испарения от определяющих его факторов могла быть использована в практических целях, она должна базироваться на массовой и общедоступной информации гидрометеорологических станций. Поэтому в качестве аргументов для связи с месячными суммами испарения выбраны средние месячные значения температуры и абсолютной влажности воздуха e, скорости ветра, дефицита влажности воздуха, глубины залегания УГВ, а также месячные суммы атмосферных осадков x.

В холодное полугодие влажность почвы, поддерживаемая осадками и капиллярной каймой грунтовых вод, на фоне низкого испарения меняется мало (коэффициент вариации 0,05) и потому не включена в число аргументов. По указанным выше причинам не включен в число аргументов и радиационный баланс; косвенно его характеризует температура воздуха, коэффициент корреляции которой с радиационным балансом в невегетационный период равен 0,80 [61].

Для проверки необходимости нормализации исходных данных рассчитана корреляционная матрица простых и нормализованных [13] значений испарения и выбранных аргументов (табл. 32). Согласно данным табл. 32, коэффициенты корреляции нормализованных величин несколько выше исходных, но рост коэффициента корреляции не столь значителен, чтобы без дальнейшего анализа отдать предпочтение более сложной структуре формулы. Для окончательного решения необходимо установить наиболее эффективные аргументы, составить уравнения простой и нормализованной регрессий и оценить их погрешность.

Таблица 32

Парные коэффициенты корреляции простых (числитель) и нормализованных (знаменатель) значений исходных данных

	E	t	e	v	H	x	d
E	1,00 / 1,00	0,77 / 0,80	0,69 / 0,72	0,49 / 0,51	−0,25 / −0,35	0,35 / 0,39	0,71 / 0,73
t		1,00 / 1,00	0,89 / 0,88	0,30 / 0,25	−0,33 / −0,40	0,18 / 0,29	0,91 / 0,91
e			1,00 / 1,00	0,18 / 0,18	0,21 / 0,16	0,42 / 0,50	0,62 / 0,67
v				1,00 / 1,00	0,07 / 0,00	0,16 / −0,08	0,27 / 0,30
H					1,00 / 1,00	0,14 / 0,02	−0,45 / −0,47
x						1,00 / 1,00	−0,10 / −0,01
d							1,00 / 1,00

Применение программы «просеивание», составленной Г. В. Груза и усовершенствованной В. Г. Коноваловым, показало, что вторым по значимости аргументом после температуры воздуха является средняя месячная скорость ветра. Сводный коэффициент корреляции месячных сумм испарения с двумя аргументами (t и v) возрастает до 0,82 для простых и до 0,86 для нормализованных значений. Включение атмосферных осадков в качестве третьего (по возрастанию сводного коэффициента корреляции) аргумента повышает коэффициент корреляции испарения с тремя факторами до 0,84 и 0,87 для простых и нормализованных величин соответственно.

Однако атмосферные осадки как аргумент не эффективны, поскольку доля их вклада в уравнение регрессии меньше удвоенной относительной средней квадратической погрешности сводного коэффициента корреляции. Согласно расчетам, удвоенная величина погрешности $2\sigma_{R_0}/R_0=0{,}10$, тогда как доля вклада третьего аргумента (x) $\delta[U(x)]=0{,}06$. Применение такого критерия оценки эффективности статистических аргументов рекомендовано в работе [13], где детально изложена и техника расчетов.

Согласно данным табл. 32, имеет место высокая корреляция испарения с абсолютной влажностью воздуха и дефицитом его влажности, но эти аргументы хорошо скоррелированы с темпе-

ратурой, включение которой подразумевает учет динамики и других элементов погоды (климата).

Из числа независимых от температуры воздуха аргументов (скорость ветра и глубина УГВ) предпочтение можно отдать величине v как имеющей более высокую корреляцию с испарением. Тогда представляется возможным построение двухфакторных уравнений простой и нормализованной регрессий, имеющих вид

$$E=3{,}33t+8{,}02v-2{,}21, \quad (46)$$

$$U(E)=0{,}716U(t)+0{,}332U(v). \quad (47)$$

Средние квадратические погрешности уравнений (46) и (47) равны 12,2 и 11,8 мм соответственно, а отношения S/σ равны 0,54 и 0,51, т. е. преимущества нормализации проявляются не слишком заметно. Все же уравнение (47) учитывает исходную нелинейность связи функции и аргументов, вследствие чего минимальное рассчитанное значение не может быть меньше минимального наблюденного. В этом уравнении доля вклада температуры воздуха составляет 0,77 и скорости ветра 0,23, т. е. динамика испарения в объеме рассматриваемой выборки (36 месяцев) на 77% объясняется динамикой температуры воздуха и на 23% колебаниями скорости ветра.

Известно, что квадрат сводного коэффициента корреляции оценивает долю объяснимой дисперсии функции, а $S_0^2=1-R_0^2$ — остаточную дисперсию, неизбежно возникающую как из-за отсутствия полного комплекса аргументов, определяющих испарение, так и в результате ошибок натурных наблюдений. В данном случае $R_0^2=0{,}742$, а $S_0^2=0{,}258$, т. е. аргументы t и v в объеме конкретной выборки объясняют 74,2% изменчивости испарения, а 25,8% остаются необъяснимыми. Поскольку подавляющая часть изменчивости испарения учтена выбранными аргументами, эмпирическое значение критерия Фишера

$$F_э=\frac{\sigma^2U(E)}{S_0^2}=3{,}56$$

оказывается достаточно высоким. Критическое его значение при 33 степенях свободы ($N-K-1$, где N — объем выборки, K — число оцениваемых параметров) и 5%-ном уровне значимости равно 2,26 [76]. Полученное неравенство $F_э>F_{5\%}$ свидетельствует о том, что двухфакторное уравнение регрессии (47) можно использовать для расчетов испарения со степенью уверенности 0,95.

Подробные результаты проверки уравнения (47) на независимом фактическом материале, не включенном в исходную выборку, помещены в статье М. И. Геткера, А. И. Сергеева и автора [61]. Здесь отметим лишь, что погрешность расчета по уравнению (46) в 71% случаев, а по уравнению (47) в 82% случаев не превосходит 20% определяемой величины (рис. 30).

Приведенные уравнения получены методом многофакторного регрессионного анализа, основным недостатком которого является

ограниченная возможность применения статистических моделей, действующих лишь на тех территориях и в тех условиях, применительно к которым они составлены. Поэтому практиче-

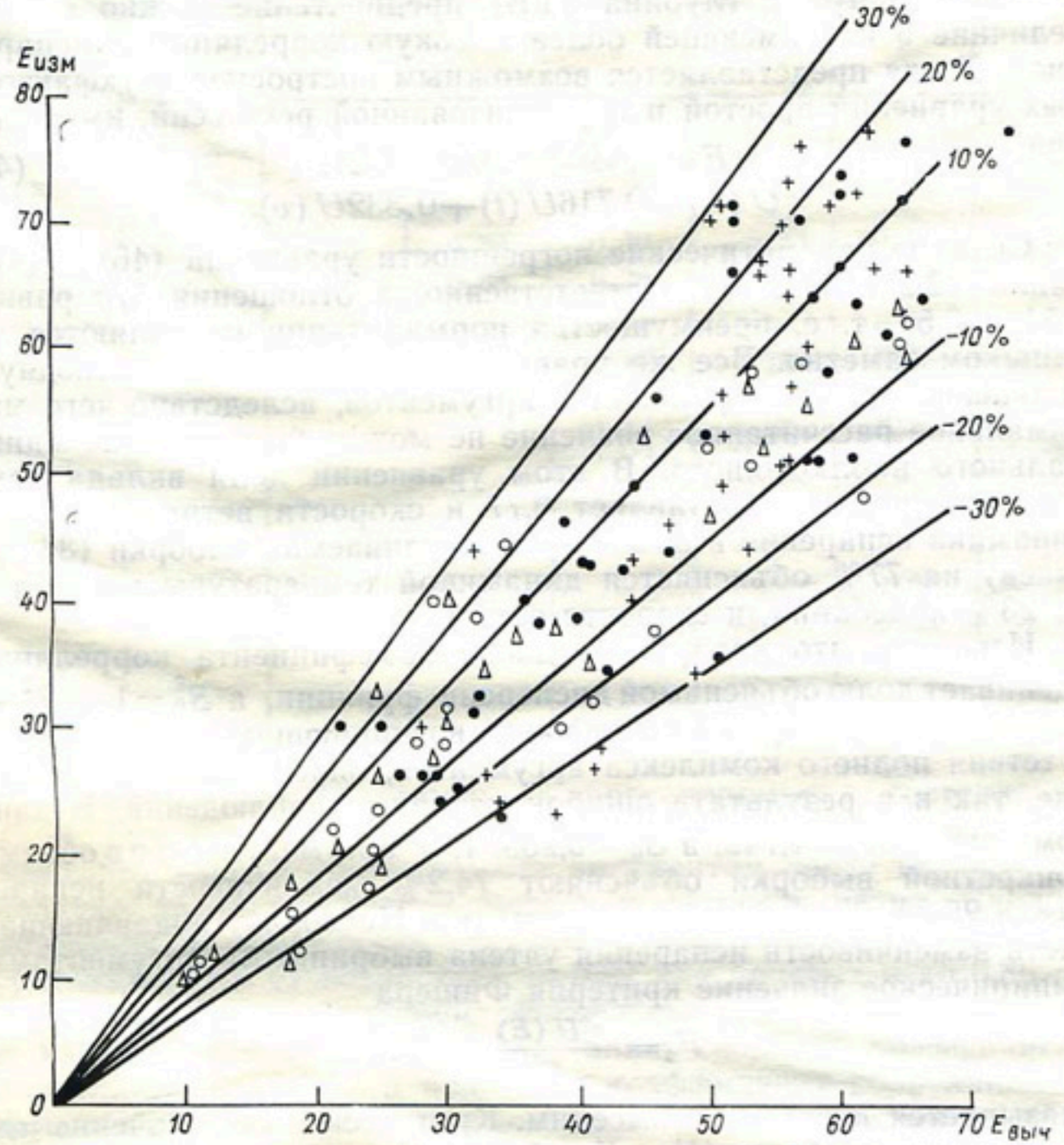


Рис. 30. Сравнение измеренных величин испарения $E_{изм}$ с вычисленными по уравнениям.

ское использование этих уравнений регрессии в условиях, отличных от условий новой зоны орошения Голодной степи и первой очереди орошения и освоения Каршинской степи, возможно лишь после специальной проверки. Как известно, этот недостаток присущ всем эмпирическим методам.[1]

[1] Предлагаемые формулы нуждаются в проверке на независимом экспериментальном материале. Их целесообразно применять в дополнение к тем, которые приведены в «рекомендациях по расчету испарения с поверхности суши» (Л., Гидрометеоиздат, 1976).— *Прим. ред.*

Глава 5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ ХЛОПЧАТНИКА И ДРЕНАЖА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОДНОБАЛАНСОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что проектирование и строительство мелиоративных систем без научно обоснованного прогноза изменения структуры водного и солевого балансов зоны аэрации может привести к значительным ошибкам. На землях со слабой естественной оточностью орошению, как правило, сопутствует быстрый подъем грунтовых вод, вызывающий переувлажнение и заболачивание почв, а при наличии в них легкорастворимых солей — и засоление зоны аэрации, что в конечном счете влечет за собой выход земель из севооборота.

Для ликвидации подобных последствий освоения земель режим орошения растений увязывают с нормой осушения и параметрами дренажа.

1. Режим орошения хлопчатника

Под режимом орошения обычно понимают совокупность числа, сроков и норм поливов, обеспечивающих в корнеобитаемом слое почвы оптимальные водно-воздушные и питательные условия при данных природных и агротехнических факторах.

Общее количество воды, подлежащее подаче на орошаемое поле под хлопчатником за период его вегетации (оросительная норма), является прежде всего функцией водопотребления растений, которое длительное время определялось как произведение коэффициента транспирации на урожай культуры. Сложность этого метода определения и его недостаточная достоверность обусловлены как отсутствием однозначной зависимости транспирации от урожая, так и значительной пространственно-временно́й изменчивостью коэффициента транспирации, зависящего от всего комплекса метеорологических условий, влажности почвы, концентрации почвенного раствора, обеспеченности растений питательными веществами, соотношения зольной и азотной пищи и других факторов.

В основу тепловоднобалансового метода определения поливного режима, разработанного С. И. Харченко [243, 244], положен принцип водного баланса зоны аэрации. Из разности уравнений

водного баланса орошаемого и неорошаемого полей вытекает приближенная формула для расчета оросительных норм:

$$M = d_E - Z_0 + E_в + M_{сб} + M_{от},$$

где d_E — недостаток водопотребления (разность между оптимальным и фактическим водопотреблением), Z_0 — потери из оросительной сети, $E_в$ — испарение с водной поверхности оросительной сети, $M_{сб}$ и $M_{от}$ — расход оросительных вод на сброс и отток соответственно.

Основным достоинством этого метода является непосредственный учет суммарного испарения с орошаемого поля, причем d_E учитывает и изменение интенсивности влагообмена грунтовых вод с зоной аэрации в условиях орошаемых полей.

В Средней Азии режим орошения хлопчатника устанавливается на основе почвенно-мелиоративного районирования, начало которого было положено В. М. Легостаевым [138] и в дальнейшем развито В. М. Легостаевым и Б. С. Коньковым [143], С. Н. Рыжовым [209], В. Е. Еременко [85], М. П. Меднисом [152] и др.

В 1966 г. институтом Средазгипроводхлопок завершено обобщенное и уточненное районирование режимов орошения на основе указанных выше исследований, а также значительного числа экспериментальных данных [262]. Согласно более поздней работе, имеющей нормативный характер [196], оросительная норма вычисляется из соотношения

$$M = K_1 K_2 (E_0 - x), \qquad (48)$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от вида культуры, а для данного вида характеризующий отклонение оптимального водопотребления от испаряемости, K_2 — коэффициент, применяемый для дифференциации оросительной нормы по гидромодульным районам и почвенно-мелиоративным областям. Испаряемость E_0 в уравнении (48) вычислялась по формуле (34) с учетом поправки (38) на категорию освоения земель.

Всего на территории Средней Азии выделено 6 широтных и 5 высотно-поясных зон, 9 гидромодульных районов и 3 почвенно-мелиоративные области (погружения, выклинивания и рассеивания грунтового потока).

Согласно этой схеме, коэффициент K_1 изменяется лишь по широтным зонам в пределах 0,6—0,7, составляя для Голодной степи (зона Ц-II) 0,65 и для Каршинской степи (зона Ю-I) 0,68. Коэффициент K_2 для III гидромодульного района равен единице и в области погружения грунтовых вод возрастает на 5—12% (I и II гидромодульные районы), а в области выклинивания грунтовых вод снижается от 0,67—0,76 (IV гидромодульный район) до 0,48—0,57 (VI—VII гидромодульные районы).

Весьма важной особенностью выполненного районирования является то обстоятельство, что при прочих равных условиях

величина K_2 в зоне рассеивания грунтовых вод, где их глубина неустойчива и определяется в основном соотношением питания и оттока, в среднем на 15% выше, чем в зоне выклинивания. Соответственно изменяются и вычисленные по уравнению (48) оросительные нормы нетто.

Применительно к III гидромодульному району (мощные суглинистые и глинистые почвы, глубина УГВ свыше 3 м) оросительная норма нетто $M_н$, очевидно, численно равна оптимальному водопотреблению хлопчатника. Для этих условий в эксплуатационный период в [196] рекомендуется M принимать равным 6800 и 7300 м³/га в Голодной и Каршинской степях соответственно, снижая нормы во всех случаях с приближением грунтовых вод к поверхности почвы.

Как известно, эталонным методом количественного определения водопотребления сельскохозяйственных культур является метод теплового баланса деятельного слоя. Определенное этим методом водопотребление хлопчатника в рассматриваемых условиях составляет 719—888 мм, а коэффициент испарения $\alpha=E/E_0$ зависит от глубины залегания УГВ (см. рис. 24). С помощью этой зависимости можно дифференцировать коэффициент K_1 по гидромодульным районам с учетом мощности и механического состава почвенно-грунтовой толщи. Строго говоря, коэффициент испарения слабо зависит от широты, поскольку снижение водопотребления растений в более высоких широтах происходит на фоне одновременного снижения испаряемости.

С другой стороны, зависимость $\alpha=f(H)$ может свидетельствовать о том, что фактический режим орошения хлопчатника был слабо увязан с гидрогеологическими условиями. Обильные поливы при близком стоянии слабоминерализованных грунтовых вод привели к подтоплению корневой системы растений и снижению транспирации. В то же время при глубине УГВ более 3 м оросительные нормы оказались недостаточными для формирования оптимального коэффициента испарения, равного 0,8 (см. рис. 24).

Если допустить, что при правильно организованном режиме орошения хлопчатника $\alpha=0{,}8$, и использовать информацию об испаряемости, полученную с учетом теплоэнергетических ресурсов территории (см. табл. 20), а также информацию об атмосферных осадках с учетом суммарной инструментальной погрешности их определения, то применительно к III гидромодульному району в эксплуатационный период оросительная норма нетто для Голодной степи составит $0{,}8\cdot(1056—87)=775$ мм и для Каршинской степи $0{,}8\cdot(1128—62)=850$ мм. Эти данные в среднем на 15% выше нормативных значений Средазгипроводхлопка (В. Р. Шредер) для тех же территорий и почвенно-гидрогеологических условий.

В то же время известно, что часть почвенной влаги растения расходуют из зимне-весенних запасов, в результате чего

запас влаги в корнеобитаемом слое почвы в конце вегетации ниже, чем в начале. По данным С. Н. Рыжова [209], соответствующим тяжелым суглинкам Ферганской долины, величина $\Delta W = W_н - W_к$ в полутораметровом слое почвы равна 75—150 мм, если проводился влагозарядковый полив, и 30—50 мм, если его не было. В среднем за период наших наблюдений преимущественно на среднесуглинистых почвах к концу вегетации влагозапасы корнеобитаемого слоя почвы уменьшались по сравнению с начальными на 90 мм при проведении влагозарядкового полива и на 30 мм при его отсутствии. Поскольку нормативные материалы предусматривают влагозарядку, можно принять $\Delta W = 90$ мм. С учетом этой величины оросительные нормы нетто, вычисленные на основе гидрометеорологической информации, практически совпадают с нормативными данными.

Таким образом, величины оросительных норм нетто и брутто с учетом требований воднобалансового подхода к определению режима орошения [124, 243, 244] в общем случае могут быть определены по приближенным уравнениям:

$$M_н = 0{,}8(E_0 - x) - I - \Delta W, \tag{49}$$

$$M_{бр} = M_н + \sum_{i=1}^{n} П_i + M_{сб}, \tag{50}$$

где I — доля грунтовых вод в суммарном водопотреблении хлопчатника, $\sum_{i=1}^{n} П_i$ — общие потери воды за период орошения.

Из структуры уравнения (49) следует, что оросительные нормы при прочих равных условиях снижаются с приближением грунтовых вод к поверхности почвы и соответственно с ростом доли грунтовых вод в суммарном водопотреблении культуры. Если оросительную норму для III гидромодульного района принять за единицу, то понижающий коэффициент, по схеме С. Н. Рыжова [211], составит 0,85 при $H = 2 \div 3$ м, 0,65 при $H = 1 \div 2$ м и 0,40 при $H = 0{,}5 \div 1$ м. Те же данные приводит В. Е. Еременко [85], называя их гидрогеологическим коэффициентом.

В. А. Духовный [79], получивший значительный фактический материал в Голодной степи, вывел зависимость отношения фактических оросительных норм к расчетным от глубины залегания УГВ. При глубине УГВ около 4 м это отношение становится меньше единицы, т. е. 0,8 при $H = 2$ м и около 0,6 при $H = 1$.

В нормативных материалах [196] влияние гидрогеологических условий орошаемых массивов учитывается коэффициентами, равными для IV, V и VI—VII гидромодульных районов соответственно 0,76, 0,73 и 0,57 в области выклинивания и 0,88, 0,84 и 0,71 в области рассеивания грунтовых вод.

В главе 2 отмечалось, что доля грунтовых вод в суммарном испарении зависит от фазы развития хлопчатника и исходной глубины УГВ. Согласно зависимости, приведенной на рис. 6, $I = 0$ в начальные и конечные фазы развития хлопчатника при

$H \geqslant 2{,}5$ м, а в активные фазы вегетации — при $H \geqslant 3$ м. В диапазоне глубин УГВ от 1 м до указанных значений I может быть вычислено по формуле (10) при известных суммах испарения или с использованием информации об испаряемости. Суммарная за период вегетации доля грунтовых вод, участвующая в водопотреблении хлопчатника, определяется последовательным сложением месячных величин, аналогично тому, как это сделано в табл. 3. Из данных этой таблицы следует, что в V гидромодульном районе Голодной степи (диапазон глубин УГВ 2—3 м) за период май—октябрь на суммарное испарение расходуется до 200 мм, или 26% оптимального водопотребления. Такой же подсчет, выполненный для VI—VII гидромодульных районов Каршинской степи, показал, что в среднем за период наблюдений $I = 300$ мм, или 35% оптимального водопотребления. Следовательно, гидрогеологические коэффициенты равны 0,74 и 0,65 для V и VI—VII гидромодульных районов соответственно, а оросительные нормы (490—510 мм) незначительно отличаются от нормативных.

Сказанное позволяет заключить, что расчетные значения оросительных норм, рекомендуемые институтом Средазгипроводхлопок (В. Р. Шредер), подтверждаются воднобалансовыми исследованиями, несмотря на некоторые различия в оценке оптимального водопотребления хлопчатника и гидрогеологических коэффициентов.

Размер оросительной нормы брутто устанавливается в зависимости от способа орошения и числа поливов. При орошении хлопчатника по бороздам потери воды на испарение за период полива составляют около 10% поливной нормы [170, 209], а для других культур 5—10% [15]. Экспериментально определенная величина сброса изменяется от 8 до 50% поливной нормы с ростом уклонов от 0,001 до 0,01 [18]. Исходя из этого, для преобладающей зоны малых уклонов можно написать

$$M_{бр} = M_{н} + 0{,}1mN + 0{,}08mN = M_{н} + 0{,}18mN, \qquad (51)$$

где m — поливная норма, N — число вегетационных поливов.

Строго говоря, величина $M_{сб}$ зависит не только от уклона, но и от всей совокупности элементов техники полива. В принципе и при значительных уклонах может быть $M_{сб} = 0$, если объем воды, накапливающийся в борозде, соизмерим с величиной сброса.

Технические указания по выбору элементов техники полива по бороздам и полосам, разработанные институтом Средазгипроводхлопок (Г. Н. Павлов, Д. Ф. Солоденников), предусматривают сброс воды в размере до 20% поливной нормы. Если большие уклоны или малая впитываемость почвы или сочетание этих факторов определяют сбросы более указанной величины, то в проекте предусматриваются мероприятия по сбору и повторному использованию оросительной сбросной воды.

В реальных производственных условиях при орошении особенно заметно сказываются погрешности капитальных и эксплуатационных планировок земель. Чередование положительных и отрицательных форм микрорельефа, увеличивающих, как отмечалось выше, пространственную изменчивость влажности почвы и глубины стояния УГВ, диктует необходимость наращивания оросительных норм с целью охвата поливом всей площади. По подсчетам Х. А. Ахмедова [24], некачественная планировка полей увеличивает оросительную норму в старой зоне орошения Голодной степи на 22—24% и в новой зоне на 35%. Этот факт является, по-видимому, одной из основных причин, объясняющих превышение фактических оросительных норм над расчетными, которое имеет место не только в условиях новоосваиваемых земель Узбекистана и других республик Средней Азии, но и в существенно иных почвенно-климатических зонах [115].

Низкое качество планировочных работ определяет и интенсивность поверхностного перераспределения воды при работе дождевальных машин, что наряду с пространственной изменчивостью слоя дождя определяет известную пестроту поверхностного увлажнения. Однако, в отличие от орошения по бороздам, колебания урожайности по площади при дождевании в значительной степени сглажены.

Дождевание в последние годы получает все более широкое распространение как способ орошения сельскохозяйственных культур, обладающий рядом преимуществ перед другими способами полива. Уже в 1973 г. суммарная площадь систем с дождеванием составила 70% общего прироста орошаемых земель [26].

Вместе с тем дождеванию сопутствуют наиболее значительные потери воды, слагающиеся из испарения в воздухе дождевых капель, ветрового относа и перехвата части воды растительным покровом. Причем единого мнения специалистов относительно величины этих потерь не имеется. Так, В. Я. Чичасов [251] сообщает, что в Голодной степи испарение с дождевых струй агрегата КДУ-55 м равно 3,7—4,2% водоподачи. По другим данным [140] потери на испарение при орошении хлопчатника дождеванием в Голодной степи агрегатом ДОС-400 составляют около 14% поливной нормы.

По материалам наблюдений в Киргизии [134], короткоструйные дождевальные агрегаты расходуют на испарение 27%, среднеструйные — 32—35% и дальнеструйные 37—44% водоподачи. Влияние дальности полета струи на испарение отмечено также в экспериментах В. А. Анисимова и М. С. Мансурова [17] на Шамхорской опытно-исследовательской станции; испарение в этих экспериментах составляет 16—24%.

Приведенные фактические данные в большинстве случаев получены как разность между водозабором и слоем дождя, достигшим поверхности почвы. При всей своей объективности этот

метод может давать существенные погрешности при неверной оценке расхода воды дождевальной машиной или недостаточной густоте осадкомерной сети.

Еще меньше информации о режиме потерь воды, связанных с перехватом осадков растениями и их последующим испарением в атмосферу. В естественных условиях величина перехвата, зависящая от предельного слоя смачивания как свойства растения и фазы его развития, может быть соизмерима с суммарной инструментальной поправкой к измеренным стандартным методом суммам атмосферных осадков [187]. При искусственном дождевании понятие предельного слоя смачивания теряет определенность как в силу непрерывности процесса испарения перехваченной влаги, так и по причине импульсного характера дождевания.

Определение величины перехвата осадков растениями производится с помощью специальных щелевых дождемеров [41], путем взвешивания отдельных растений до и после дождевания [17] и другими методами, подробный анализ которых изложен в работе [260].

Для оценки потерь воды при дождевании хлопчатника широкозахватной дождевальной машиной «Фрегат» опытно-производственный участок в голодностепском совхозе № 1 был оборудован серией дождемеров (80—100 шт.) и плювиографов (7 шт.), геометрически равномерно установленных по 6 створам-радиусам. Около половины дождемеров устанавливались по принципу почвенных осадкомеров, в то время как вторая половина крепилась на специальных раздвижных подставках, позволяющих менять высоту установки приборов по мере роста растений. Потери воды на испарение в воздухе и снос ветром определялись по разнице между водозабором в дождевальный агрегат и слоем дождя, зафиксированным над пологом растений. Разница в показаниях дождемеров, установленных над и под пологом растительного покрова, соответствовала перехвату.

Подобный эксперимент проводился в течение 11 вегетационных поливов хлопчатника (1973—1975 гг.) и показал, что в условиях новой зоны орошения Голодной степи потери на испарение относительно стабильны во времени и составляют около 15% средней поливной нормы за сезон, равной 730 м³/га (табл. 33).

Полученные потери воды на испарение и снос ветром при дождевании хлопчатника машиной «Фрегат» хорошо согласуются с результатами других экспериментов в Голодной степи [96], но значительно ниже результатов специальных испытаний этой машины [149], что при прочих равных условиях может быть следствием различий в динамике метеорологических элементов.

Потери воды на перехват хлопчатником прогрессивно нарастают по мере увеличения высоты растений и площади листовой поверхности и в целом за период вегетации соизмеримы с потерями на испарение (табл. 33).

Таблица 33

Потери воды при дождевании хлопчатника машиной «Фрегат» в Голодной степи (среднее за период 1973—1975 гг.)

Номер полива	Период	Средняя высота растений (см)	Испарение и снос влаги ветром		Перехват влаги растениями (мм) при покрове		
			мм	% от поливной нормы	сомкнутом	фактическом	% от слоя дождя
1	20—30 VI	11	12,7	18,2	12,8	1,2	3,0
2	10—20 VII	36	9,6	15,1	16,6	6,9	9,7
3	25—31 VII	58	13,9	14,9	16,4	8,0	11,7
4	15—20 VIII	82	8,4	17,6	19,5	9,9	35,4
Среднее			11,2	16,4	16,3	6,5	14,9

Полагая суммарные потери воды при дождевании равными 30% и исключая потери на сброс, получаем

$$M_{бр} = M_{н} + 0{,}3\overline{m}, \qquad (52)$$

где $\overline{m}$ — средняя поливная норма.

Для систем внутрипочвенного орошения, по-видимому, можно допустить равенство $M_{бр} = M_{н}$.

Из уравнения (49) следует, что оросительная норма во всех случаях меньше оптимального водопотребления, если в нем принимают участие грунтовые воды. Это условие справедливо для удовлетворения требований растений к режиму влажности корнеобитаемых горизонтов почвы или при наличии пресных грунтовых и оросительных вод. Между тем минерализация сырдарьинской воды в створе Бекабада уже сейчас составляет около 1 г/л и по существующим прогнозам [60] к 1980 г. возрастет еще на 40% вследствие увеличения доли возвратных вод в общем стоке реки в данном створе.

Значительно выше минерализация грунтовых вод. Например, в голодностепском совхозе № 1 исходная (до освоения) минерализация грунтовых вод составляла 20—30 г/л, но через 12 лет орошения в результате подъема УГВ и включения в работу системы закрытого горизонтального дренажа минерализация хотя и снизилась, но все же осталась на уровне 5—7 г/л [220].

В этих условиях при расчете оросительных норм по уравнению (49) без дополнительных мелиоративных мероприятий возможно накопление солей в корнеобитаемых горизонтах зоны аэрации вследствие превышения восходящих токов воды, а следовательно, и легкорастворимых солей над нисходящими. Накопление солей вызывает значительное повышение осмотического давления почвенного раствора и так называемую физиоло-

гическую сухость почвы, которая замедляет развитие растений [238].

Если рассматривать оросительную норму не только как средство для обеспечения оптимального водного режима зоны аэрации, но и как способ ее опреснения, то возникает необходимость в наращивании затрат воды по мере приближения к поверхности уровня грунтовых вод и увеличения их доли в суммарном водопотреблении растений. В связи с этим представляет интерес вывод И. П. Айдарова [9], согласно которому наибольшие затраты оросительной воды (до 20 000 м³/га) наблюдаются при луговом режиме почвообразования, когда УГВ залегает на глубине около 1 м, а наименьшие — при автоморфном режиме (глубина УГВ более 3 м). Исследования последних лет, проведенные И. К. Киселевой [108], также не подтвердили экономию оросительной воды при близком стоянии УГВ, если учитывать не только вегетационные, но и промывные поливы.

Сказанное, по-видимому, в равной степени относится и к дождеванию как способу орошения сельскохозяйственных культур, который, как принято считать, позволяет снижать затраты оросительной воды. Между тем многолетний опыт голодностепского совхоза «Пахта-Арал» свидетельствует о достижении высокой эффективности дождевания хлопчатника лишь на фоне обильных влагозарядковых поливов [173, 190].[1]

С учетом обеспечения оптимального водного и солевого режимов зоны аэрации уравнение (49) перепишем в виде

$$M_{н} = 0{,}8\,(E_0 - x) + \Delta M - \Delta W, \qquad (53)$$

где ΔM — некоторое добавочное количество оросительной воды, необходимое для ликвидации угрозы засоления корнеобитаемых горизонтов почвы и, согласно рекомендациям [189], равное 10—30% нормы орошения хлопчатника.

Величину ΔM можно определить из допущения, согласно которому она равна доле грунтовых вод, участвующих в водопотреблении хлопчатника, увеличенной на сумму дренажного стока q, т. е.

$$\Delta M = I + q. \qquad (54)$$

Режим расхода грунтовых вод в зону аэрации рассмотрен выше применительно к V и VI—VII гидромодульным районам в Голодной и Каршинской степях соответственно. Если эти данные привести к одинаковой испаряемости, то получим, что в V гидромодульном районе $I = 26\%$, а в VI—VII районах $I = 33\%$ оросительной нормы. Наблюденные значения дренажного стока в зоне действия системы закрытого горизонтального дренажа

[1] При оценке гидрологической эффективности дождевания необходимо учитывать не только потери влаги на испарение, задержание влаги растениями и др., но и улучшение микроклимата, способствующее повышению урожайности.— *Прим. ред.*

составляют в среднем около 7% оросительной нормы (табл. 34). С учетом этих данных величина ΔM оценивается в размере 33 и 40% оросительной нормы, назначенной для области рассеивания грунтовых вод V и VI—VII гидромодульных районов соответственно.

Таблица 34

Дренажный сток за период вегетации в системе закрытого горизонтального дренажа (совхоз № 1 Голодной степи)

Год	H м	M м³/га	q м³/га	$\frac{q}{M} \cdot 100\%$
1971	2,62	7860	625	8,0
1972	2,21	5500	644	11,7
1973	2,28	4840	95	2,0
1974	2,66	5420	274	5,1
Среднее	2,44	5905	409	6,9

Для вычислений по формуле (53) принимаем минимальное из наблюденных зачений $\Delta W = 30$ мм, поскольку в этом случае предполагается отсутствие влагозарядки. Тогда оросительная норма окажется равной 9500 м³/га (V район) и 10 600 м³/га (VI—VII районы). Подавать такую норму в течение вегетации хлопчатника нецелесообразно как вследствие возможного напряжения оросительной сети, так и в связи со снижением аэрации и неизбежного угнетения растений при грузных поливных нормах. Тот же эффект рассоления может быть достигнут и при подаче части оросительной нормы в невегетационный период.

Нормативные материалы, помимо вегетационных, предусматривают обязательные влагозарядковые и предпахотные поливы. Норма влагозарядки рекомендуется в размере 2300 м³/га (V район) и 3900 м³/га (VI—VII районы), а размер предпахотного полива для всех зон, областей и гидромодульных районов одинаков и составляет 700 м³/га. Таким образом, водоподача невегетационного периода равна 3000 м³/га (V район) и 4600 м³/га (VI—VII районы) или 53 и 81% оросительной нормы соответственно.

Норму невегетационного полива M_1, имеющую главной целью опреснение зоны аэрации и поддержание оптимальных влагозапасов корнеобитаемых горизонтов почвы в межфазный период всходы—бутонизация хлопчатника, можно определить, вычитая уравнение (49) из (53). Тогда с учетом (54) получим

$$M_1 = 2I + q - x_н, \qquad (55)$$

где $x_н$ — сумма атмосферных осадков невегетационного периода.

Если использовать в расчетах общую сумму атмосферных осадков за холодное полугодие в Голодной и Каршинской сте-

пях (218 и 205 мм соответственно), то норма невегетационной водоподачи составит 2200 и 4300 м³/га. Но, как отмечалось в главе 2, питание грунтовых вод имеет место лишь при выпадении дождей слоем, превышающим 5 мм. Поэтому с точки зрения естественной промывки зоны аэрации в расчет следует включать сумму осадков, слагающуюся лишь из эффективных (промывных) дождей. Средние многолетние суммы таких осадков равны 132 мм в Голодной степи (станция Сырдарья) и 138 мм в Каршинской степи (станция Карши), или соответственно 61 и 67% общего количества осадков за холодное полугодие. С учетом этих величин норма невегетационной водоподачи для V гидромодульного района зоны Ц-II будет равна 3060 м³/га и для VI—VII гидромодульных районов зоны Ю-I 4970 м³/га.

Теперь представляется возможным оценить общую оросительную норму. Для указанных районов она равна 5100+3060= =8160 м³/га и 4900+4970=9870 м³/га, но подлежит, по-видимому, корректировке применительно к конкретным условиям, для которых известна доля дренажного стока в период вегетации хлопчатника, а также соотношение между притоком и оттоком грунтовых вод.

Полученные значения общих оросительных норм основаны на широко распространенном допущении, согласно которому приток грунтовых вод в рассматриваемых условиях равен оттоку. Поскольку нормативные материалы, вычисленные существенно иным методом, рекомендуют практически те же размеры общей водоподачи (8700 и 9700 м³/га), то на современном этапе исследований их следует считать достаточно надежными.

В соответствии с гидромодульным районированием изменяется соотношение между нормами водоподачи за теплое и холодное полугодия, хотя в принципе этим соотношением можно варьировать, сохраняя стабильность годовой оросительной нормы. Согласно полученным данным, в V гидромодульном районе области рассеивания грунтовых вод оросительная норма составляет 62% общей, а в VI—VII районах зоны Ю-I в теплое и холодное полугодия подается примерно равное количество воды.

Для проверки этих соотношений воспользуемся методом С. Ф. Аверьянова, детально обоснованным в работе [6], которая весьма часто цитируется в научной литературе. Реализацией метода является уравнение

$$n = -\frac{n_2 v_2}{v_1 - v_2} + \left(n_1 + \frac{n_2 v_2}{v_1 - v_2}\right) e^{\frac{(x_1 - x)(v_1 - v_2)}{m D^*}}, \qquad (56)$$

где n — концентрация почвенного раствора (г/л), n_2 — минерализация оросительной воды, v_1 и v_2 — средние годовые интенсивности расхода и поступления воды (м/сут.), n_1 — минерализация грунтовых вод, x_1 — средняя годовая глубина УГВ, x — расстояние рассматриваемого горизонта почвы от УГВ, m — общая

порозность почвы, D^* — коэффициент конвективной диффузии ($м^2$/сут.).

Уравнение (56) позволяет определить необходимый размер общей водоподачи на орошаемое поле с целью поддержания концентрации почвенного раствора конкретного горизонта почвы на заданном уровне или понижения этой концентрации до заданного значения. Та же задача, но для всей зоны аэрации, решается с помощью уравнения

$$n_{ср} = -\frac{\bar{n}_2}{\bar{v}-1} + \frac{\bar{v}(\bar{v}-1+\bar{n}_2)}{2\mathrm{Pe}\,(v_1-1)^2}\left[e^{2\mathrm{Pe}\left(1-\frac{1}{\bar{v}}\right)}-1\right], \qquad (57)$$

где $n_{ср}$ — отношение минерализации почвенного раствора в слое от поверхности почвы до УГВ к минерализации грунтовых вод, n_2 — отношение минерализации оросительной воды к минерализации грунтовой, $\bar{v}$ — отношение испарения к оросительной норме, Pe — параметр Пекле, равный

$$\mathrm{Pe} = \frac{v_1 x_1}{2mD^*}.$$

В качестве исходных данных для расчета используем результаты многолетних наблюдений в голодностепском совхозе № 1 (V гидромодульный район), принимая коэффициент конвективной диффузии, согласно исследованиям Средазгипроводхлопка (А. Н. Морозов), равным $2 \cdot 10^{-4}$ $м^2$/сут. Эта величина получена путем подбора на ЭВМ такого значения D^*, которое соответствует фактической эпюре засоления.

Допустимую засоленность почвы по хлору, согласно [200], принимаем равной 0,04% веса. Эта величина используется в качестве критерия при назначении эксплуатационных промывок и при прочих равных условиях обеспечивает урожай сырца свыше 30 ц/га [198]. Если допустимая засоленность равна 0,04%, то при влажности почвы $W = W_{ВРК} = 0{,}19$ и среднем объемном весе 1,5 г/$см^3$ концентрация почвенного раствора составит 3,15 г/л.

Согласно данным табл. 25, $\bar{v} > 1$, и при учете атмосферных осадков это соотношение в период вегетации хлопчатника не изменяется, что свидетельствует об угрозе засоления зоны аэрации. Подсчет по уравнению (57) показывает, что при данных входных параметрах концентрация почвенного раствора будет поддерживаться близкой к допустимой (2,98 г/л), если годовая водоподача составит 8630 $м^3$/га. Поскольку средняя за период наблюдений оросительная норма равна 5900 $м^3$/га (табл. 25), то невегетационная водоподача должна быть 8630—5900 = = 2730 $м^3$/га, или 32% годовой оросительной нормы, что хорошо согласуется с результатами, приведенными выше. С учетом атмосферных осадков $\bar{v} < 1$ и потому в данном случае угроза реставрации засоления отсутствует.

Обратимся к вопросу о поливных нормах, под которыми понимают количество оросительной воды, необходимое для разового увлажнения активного слоя почвы на единице площади под данной сельскохозяйственной культурой.

Размер поливной нормы m обычно определяется по известной формуле, предложенной А. Н. Костяковым [124],

$$m_{\text{н}} = h(A - r), \tag{58}$$

где h — мощность активного слоя почвы (см), A и r — соответственно верхний и нижний пределы оптимального увлажнения активного слоя (% от объема).

За верхний предел увлажнения принимается наименьшая влагоемкость почвы, а нижний предел, согласно многократно проверенным рекомендациям [204, 209], равен влажности разрыва капиллярной связи или примерно 0,7НВ. Тогда уравнение (58) запишется в виде

$$m_{\text{н}} = 0{,}3h\,W_{\text{НВ}}, \tag{59}$$

$$m_{\text{бр}} = m_{\text{н}} + \sum_{i=1}^{n} П_i. \tag{60}$$

Существующее стремление сократить расход оросительной воды путем снижения влажности почвы в отдельные фазы вегетации хлопчатника до 0,55—0,65НВ [81, 86] не оправдывает себя на практике [30]. При такой влажности резко снижаются затраты радиационного тепла на суммарное испарение (рис. 28), сокращается урожай хлопчатника [266].

На опытно-мелиоративных станциях величина предполивной влажности почвы устанавливается обычно по урожаю сырца, полученному при всевозможных комбинациях вариантов, в которых предполивная влажность принята в различных пределах. В таких экспериментах, обстоятельная сводка которых приведена в монографии М. П. Медниса [152], равенство прочих условий, как правило, не соблюдается, а принятые варианты опыта зачастую отличаются друг от друга на величину, лежащую в пределах погрешности учета водоподачи и самой величины влажности почвы. К такому выводу пришел, например, В. К. Гафуров [58].

Согласно уравнению (59), для количественной оценки поливной нормы необходимо располагать информацией о мощности активного (корнеобитаемого) слоя почвы и наименьшей влагоемкости почвы. Величина $W_{\text{НВ}}$ определяется в процессе изысканий под проекты освоения и орошения земель или рассчитывается по данным о содержании в почве физической глины [186].

Мощность активного слоя почвы h является объективным показателем, характеризующим развитие хлопчатника в процессе вегетации, и, по данным ряда авторов [84, 209, 255 и др.], достигает 100 см или даже 140 см [166] в активные фазы вегетации.

Но в одну и ту же фазу вегетации хлопчатника мощность активного слоя почвы будет тем больше, чем глубже залегают грунтовые воды, определяющие при прочих равных условиях влажность зоны аэрации. Отмывка корневых систем на Бешкентском опытном участке в Каршинской степи при глубине грунтовых вод около 1 м в фазу плодообразования хлопчатника показала, что корневая система не выходит за пределы первого полуметрового слоя (посев с шириной междурядий 90 см), а при грунтовых водах, залегающих на глубине 3—4 м (Голодная степь, ширина междурядий 60 см), стержневой корень прослеживался до глубины 100 см. Но и в этом случае максимальная насыщенность корнями также соответствовала первому полуметру почвы.

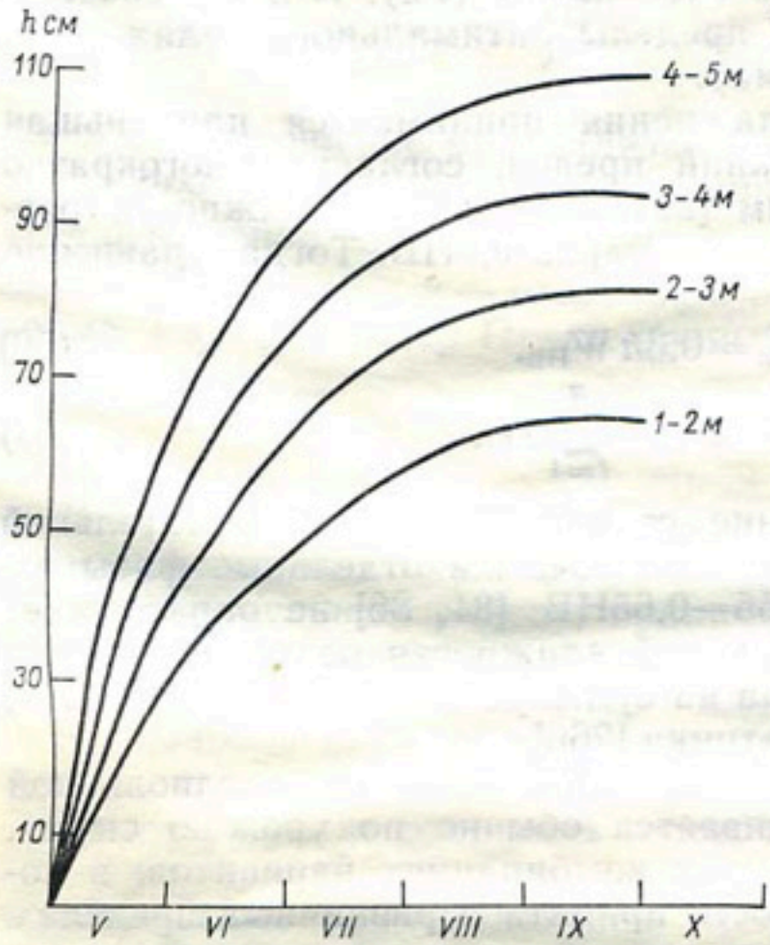


Рис. 31. Изменение мощности активного слоя почвы h в период вегетации хлопчатника под влиянием глубины УГВ (цифры у кривых).

Для глубин УГВ до 1 м Б. В. Федоров [238] рекомендует рассчитывать поливную норму исходя из увлажнения слоя почвы 40—50 см, но если УГВ залегает на глубине 1—2 и 2—3 м, то h соответственно равно 70—80 и 80—100 см. Аналогичный ход изменения h под влиянием глубины УГВ приводят Н. Ф. Беспалов и С. Н. Рыжов [29], но данные этих авторов на 20—40 см ниже рекомендуемых Б. В. Федоровым для глубин УГВ 1—2 и 2—3 м.

Таким образом, при прочих равных условиях мощность активного слоя почвы является функцией времени и глубины стояния УГВ. Такая зависимость представлена на рис. 31, который обобщает данные перечисленных выше авторов, а также результаты, полученные на наших опытных участках. Согласно рис. 31, влияние глубины УГВ на h прогрессивно увеличивается от начала вегетации к концу. Например, в период созревания хлопчатника в диапазоне глубин УГВ 1—5 м погружение грунтовых вод на 1 м увеличивает мощность активного слоя почвы в среднем на 15 см. В то же время известно, что при прочих равных

условиях активный слой почвы независимо от глубины УГВ может изменять свою мощность, отождествляемую обычно с глубиной распространения преобладающего количества корней, и под влиянием режима орошения, поскольку для растения решающее значение имеет количество воды в почве, находящееся в ближайшем соседстве с корнями [231].

Частые поливы малыми нормами даже при глубоком залегании УГВ лишают корневую систему стимула к росту в глубину, поскольку воду и необходимые питательные вещества растения получают из верхних горизонтов почвы. В связи с этим необходимо уточнить, что зависимость на рис. 31 соответствует оптимальной схеме полива так, как ее трактуют авторы, по данным которых эта зависимость построена. К тому же она не противоречит фактически наблюдавшейся схеме полива (табл. 25) при различной глубине стояния грунтовых вод.

В уравнении (59) величина $W_{НВ}$ является константной, хотя и условной, для почвы данного механического состава, и потому размер поливной нормы целиком определяет h, величина которого в V гидромодульном районе (глубина УГВ 2—3 м) к концу бутонизации, в цветение и к началу созревания хлопчатника равна соответственно 45, 70 и 80 см (рис. 31). Тогда, принимая для средних суглинков $W_{НВ}=27\%$, получаем поливную норму 370—650 м³/га в течение периода вегетации.

Нетрудно подсчитать, например, по формуле (45), что даже при самых неблагоприятных метеорологических условиях такое количество воды будет израсходовано хлопковым полем менее чем за декаду. С подобными низкими значениями поливных норм сталкивались многие авторы, использовавшие уравнения, аналогичные (59).

С этим, очевидно, связаны рекомендации увеличивать вычисленные по влажности почвы поливные нормы и в начале вегетации при минимальных значениях h [175] и в последующие фазы, полагая $h=120\div150$ см независимо от глубины преимущественного распространения корней [62].

По мнению В. Р. Шредера [261], поливная норма, установленная по наименьшей влагоемкости, должна быть увеличена в 1,5—2 раза для того, чтобы обеспечить увлажнение почвы на заданную глубину. Этот вывод хорошо согласуется с результатами других авторов [168, 204], а, согласно сводке А. П. Аверьянова [3], несоответствие между фактической и расчетной глубиной насыщения имеет место на самых различных типах почв.

Увеличивая в 1,5 раза полученные выше поливные нормы, определяем разовую водоподачу нетто в размере 560 м³/га на начало поливного периода и 970 м³/га в его конце.

Размер поливной нормы, помимо уже упомянутых факторов, существенно зависит от способа водоподачи. При эксплуатации систем внутрипочвенного орошения или дождевальных установок полученные величины поливных норм могут быть легко

реализованы, равно как и еще меньшие величины, но при бороздковом орошении существует некоторый технологический минимум водоподачи, не зависящий от мощности активного слоя почвы и определяемый главным образом уклоном, впитывающей способностью почв и соответственно назначенными параметрами техники полива.

Согласно расчетам элементов техники полива хлопчатника, выполненным Н. Т. Лактаевым [132], в рассматриваемых условиях технологический минимум водоподачи составляет $m_н = 986$ м³/га, а водоподача брутто, определенная с учетом сброса и потерь воды на испарение за время полива, равна примерно 1200 м³/га. В этих расчетах суммарные потери воды оцениваются в размере 18—20% поливной нормы нетто, что находится в соответствии с уравнением (51).

Верхний предел оптимальной разовой водоподачи определяется из условия, согласно которому подъем грунтовых вод за полив не должен повлечь за собой подтопления активного слоя почвы.

С этой точки зрения значительный интерес представляет предложение рассматривать поливную норму как количество воды, необходимое для подъема УГВ с отметки, обеспечивающей среднюю влажность заданного слоя почвы на уровне $W_{врк}$, до отметки, соответствующей влажности того же слоя $W_{нв}$ [50, 170].

Из зависимости $W=f(H)$ (см. рис. 14) следует, что в межполивной интервал влажность верхнего полуметрового (активного) слоя почвы равна 0,7НВ при залегании грунтовых вод на глубине 250 см, но верхний предел той же зависимости является весьма условным, потому что любое приращение глубины УГВ в результате полива заведомо обеспечивает сквозное промачивание зоны аэрации и (при ее мощности 250 см) увлажнение верхнего слоя до $W \geqslant W_{нв}$. Тогда допустим, что к концу полива эпюра влажности зоны аэрации после стока гравитационной воды из верхних горизонтов представляет собой капиллярную кайму грунтовых вод. С учетом высоты капиллярного поднятия (около 150 см) поливная норма должна поднять УГВ на $\Delta H = 250 - 150 = 100$ см, чтобы не нарушать оптимальный водно-воздушный режим корнеобитаемого слоя. Согласно зависимости, представленной на рис. 2, при исходной глубине УГВ около 250 см на подъем грунтовых вод за период вегетационного полива расходуется около 25% водоподачи брутто. Отсюда следует, что при $\mu \approx 0{,}1$ подъем УГВ с 250 до 150 см обеспечит полив в размере 2500 м³/га брутто, который и является верхним пределом оптимальной разовой водоподачи в данных условиях (V гидромодульный район зоны Ц-II).

Применительно к рассматриваемому району такая же поливная норма брутто иным путем вычислена Г. Н. Павловым [170].

При прочих равных условиях рост, развитие и урожай хлопчатника зависит от степени распределения оросительной нормы

во времени. Начнем с влагозарядки, которая не только способствует увеличению запасов влаги в почве, но и позволяет более рационально использовать оросительную сеть. Одновременно влагозарядковый полив создает благоприятные условия для роста и деятельности зародышевых и узловых корней, а также для начального роста листьев, он заметно снижает концентрацию клеточного сока, сосущую силу, осмотическое давление и водопоглощающую способность листьев [175].

Для V гидромодульного района зоны Ц-II нормативом рекомендуется завершить влагозарядку в течение марта. Этот срок является оптимальным с учетом сева хлопчатника в третьей декаде апреля и необходимости поддержания к дате сева влажности верхнего горизонта почвы на уровне, обеспечивающем ее качественную обработку [191].

Распределение оросительной нормы по месяцам вегетационного периода при отсутствии иной информации назначают, исходя из так называемой схемы полива, характеризующей число поливов по фазам развития хлопчатника. По-видимому, первое обоснование схемы полива было дано Р. Р. Шредером еще в 1905 г., но в последние годы его классическая схема (1—3—1) подверглась существенному пересмотру [28, 29].

В настоящее время разработаны методы определения сроков полива хлопчатника и других сельскохозяйственных культур по внешним признакам [84, 229], по приросту главного стебля [25], по сосущей силе клеточного сока листьев [254], по скорости движения водного тока в стебле растения [100], по температуре листьев [268] или степени их перегрева [167], а также по ряду других показателей, обзор которых приведен в статье С. Н. Рыжова [210]. Следует считать физически обоснованным использование потенциала почвенной влаги в качестве объективного параметра влагообеспеченности зоны аэрации. Потенциал влаги, как величина, характеризующая энергию жидкости в дисперсной системе, применим для сравнительной оценки состояния влаги в грунтах с различными водными свойствами, каждому из которых соответствует определенное значение потенциала. Поэтому с помощью аппарата потенциала влаги и датчиков, фиксирующих его динамику, можно обоснованно назначать пределы оптимальной влажности для различных почв и соответственно вырабатывать команду на полив.

Однако все эти методы не нашли широкого применения на практике по причинам субъективности определения одних показателей (например, внешних), отсутствия методов оперативного и достоверного определения других (например, физиологических) или необходимости в сложном техническом оснащении при использовании третьих показателей (потенциал влаги). Не исследована и степень репрезентативности отдельного измерения или серии измерений показателей сроков полива, что является общим недостатком указанных методов.

Хотя установление зависимости среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации влажности от потенциала [46] открывает перспективы его использования и с точки зрения репрезентативности, все же на современном этапе исследований представляется целесообразным принять влажность активного слоя почвы в качестве объективного критерия срока полива. Влажность почвы, тесно связанная с ординатами биологических кривых [14, 34], является интегральным показателем, формирующимся в результате одновременного воздействия всей совокупности элементов водного баланса зоны аэрации.

Метод определения сроков полива по влажности почвы имеет почти полувековую историю [209], но широкому его использованию в практике орошаемого земледелия препятствовала трудоемкость и малая оперативность термостатно-весовых измерений, степень репрезентативности которых невелика в силу значительной пространственной изменчивости самой влажности почвы и ее объемного веса.

Внедрение нейтронного метода и оценка необходимого количества скважин на основании параметров корреляционных функций (см. табл. 18) существенно облегчает использование информации о динамике влажности с целью определения оптимальных сроков вегетационных поливов. В этом плане представляется особенно перспективным метод определения влажности почв на больших площадях с помощью специальных чувствительных радиометров, устанавливаемых на самолете и фиксирующих гамма-излучение почвенного покрова [72].

Таким образом, по динамике влажности почвы может быть установлен оптимальный срок всех вегетационных поливов, включая первый. К моменту первого полива мощность активного слоя почвы лишь незначительно превышает глубину заделки семян, и полив рекомендуется назначать по влажности слоя почвы мощностью 40—60 см [211]. В этот период запас влаги верхнего полуметрового слоя сформировался главным образом в результате влагозарядки и атмосферных осадков, а его изменение слабо зависит от положения грунтовых вод и практически полностью определяется испаряемостью. Поэтому для определения оптимального срока первого вегетационного полива можно воспользоваться зависимостью относительной влажности почвы от суммы испаряемости за период от всходов хлопчатника до первого вегетационного полива, обеспечивающего нормальное развитие растений (см. рис. 9). Согласно этой зависимости, первый вегетационный полив назначается, когда сумма испаряемости, начиная от даты всходов, достигает 170 мм, а влажность почвы снижается до 0,7НВ.

После первого полива быстро возрастает мощность активного слоя почвы, запасы влаги которого изменяются в результате одновременного воздействия суммарного испарения и расхода грунтовых вод в зону аэрации. Поэтому для назначения срока оче-

редного полива приемлемо уравнение (26). Решая его относительно продолжительности межполивного интервала T, получаем

$$T=\frac{1}{\beta H}\ln\left(\frac{W_{н}/W_{нв}-W_{вз}/W_{нв}}{W_{к}/W_{нв}-W_{вз}/W_{нв}}\right). \qquad (61)$$

Задавая $W_{н}/W_{нв}=1{,}10$ и $W_{к}/W_{нв}=0{,}7$, можно определить продолжительность межполивного интервала при известных водно-физических свойствах почвы, определяемых ее механическим составом, и глубине залегания УГВ. Например, для средних суглинков V гидромодульного района зоны Ц-II $\beta=0{,}0245$ и $W_{вз}/W_{нв}=0{,}41$. Тогда уравнение (61) примет простой вид

$$T=35/H, \qquad (62)$$

где H — глубина УГВ (м). Уравнение (62) справедливо в поливной период (июнь—август), когда грунтовые воды принимают активное участие в формировании влажности почвы, а их сработка обусловлена главным образом расходом в зону аэрации, который на порядок больше дренажного стока.

В соответствии с рис. 11 расчеты по уравнению (62) распространяются на активный слой почвы мощностью до 50 см. При $h>50$ см расчетная продолжительность межполивного интервала берется с коэффициентом 1,20, учитывающим неоднородность сработки влагозапасов по горизонтам зоны аэрации. Этот коэффициент получен по уравнениям регрессии (27) путем сопоставления интенсивности сработки влагозапасов активного слоя почвы переменной мощности при заданных значениях T и H. Этот технический прием не противоречит, а уточняет рекомендации ряда авторов [82, 239 и др.], полагающих влажность верхнего горизонта почвы мощностью 30—50 см достаточно надежным критерием установления даты полива в течение всей вегетации хлопчатника.

На основании результатов воднобалансовых исследований вычислим в качестве примера режим орошения хлопчатника по бороздам для средних суглинков V гидромодульного района Голодной степи при отсутствии фильтрации из каналов и лотковой оросительной сети, КПД которой близок к единице [65]. Тогда уравнение водного баланса можно записать в виде

$$m-q-E\pm\mu\Delta H\pm\Delta W=0, \qquad (63)$$

где все обозначения прежние.

Величина дренажного стока уточнена в следующем разделе, а в данном примере для простоты вычисления, а также с учетом табл. 41 примем, что сработка запасов грунтовых вод происходит главным образом под действием их расхода в зону аэрации.

Зададим период влагозарядкового полива 20—25 марта и глубину УГВ на начало влагозарядки $H=300$ см. Норма этого полива, определенная выше, равна 3060 м³/га нетто, или 3600 м³/га

брутто. Для оценки подъема грунтовых вод в результате полива воспользуемся зависимостью $\mu \Delta H_{\uparrow}/m = f(H_{н})$ (см. рис. 2), согласно которой при начальном УГВ на глубине 300 см и параметре водоотдачи (водовместимости) грунта $\mu \approx 0{,}1$ на приращение запасов грунтовых вод расходуется 25% поливной нормы. Тогда $\mu \Delta H_{\uparrow} = 0{,}25 \cdot 3600 = 90$ см и $H = 300 - 90 = 210$ см.

После влагозарядки расчет ведется на даты посева и всходов хлопчатника. Если принять за среднюю дату посева 21 апреля, то, согласно многолетним наблюдениям на станции Мирзачуль, средней датой всходов является 3 мая [7].

За период от конца влагозарядки до посева (25 марта — 21 апреля) сумма атмосферных осадков (средние многолетние данные) составила 39 мм, из которых 20 мм выпали дождями слоем $x > 5$ мм. Согласно верхней кривой графика зависимости $\mu \Delta H_{\uparrow}/x = f(H_{н})$ (см. рис. 5), при $H_{н} = 210$ см $\mu \Delta H_{\uparrow} = 0{,}25 \cdot 20 = 5$ см.

За тот же период сработка запасов грунтовых вод $\mu \Delta H_{\downarrow} = IE$, где I — доля грунтовых вод в суммарном испарении E. Величина I, зависящая для грунтов данного механического состава от глубины УГВ и фазы развития хлопчатника, определяется по уравнению (10) или по зависимости на рис. 6. Тогда сработка УГВ легко вычисляется при наличии информации о суммарном испарении или аргументах, необходимых для его расчета. Если такая информация отсутствует, используются данные об испаряемости на конкретный период освоения земель (см. табл. 20).

За период 25 марта — 21 апреля $E = 70$ мм, $I = 0{,}38$. Тогда $\mu \Delta H_{\downarrow} = 0{,}38 \cdot 70 = 27$ см и $H = 210 + 27 - 5 = 232$ см.

За период 21 апреля — 3 мая сумма эффективных (слоем $x > 5$ мм) осадков составляет 10 мм, что при начальном $H_{н} = 232$ см дает подъем УГВ $\mu \Delta H_{\uparrow} = 0{,}22 \cdot 10 = 2$ см. При той же исходной глубине УГВ $I = 0{,}21$, а сумма испарения за период посев—всходы хлопчатника $E = 36$ мм. Сработка грунтовых вод $\mu \Delta H_{\downarrow} = 0{,}21 \cdot 36 = 8$ см. Тогда на 3 мая $H = 232 + 8 - 2 = 238$ см. Этот и дальнейший ход расчетов более нагляден в графическом изображении (рис. 32).

Первый вегетационный полив, согласно зависимости на рис. 9, назначается, когда сумма испаряемости начиная от даты всходов достигает 170 мм. Этот период, как правило, не совпадает с календарными месяцами, и потому данные табл. 20 служат лишь для контроля, а испаряемость рассчитывается по уравнению (40). В данном примере необходимая сумма испаряемости, при которой влажность верхнего горизонта почвы сработается до 0,7НВ, наберется к 3 июня. Эта дата и является датой первого вегетационного полива.

Определим положение УГВ на начало полива (3 июня). За период 3 мая — 3 июня слой эффективных осадков составил 15 мм, в результате чего УГВ поднялся на $\mu \Delta H_{\uparrow} = 0{,}2 \cdot 15 = 3$ см.

За тот же период $E=112$ мм, а при $H_н=238$ см $I=0{,}12$ и $\mu\Delta H_↓=$ $=0{,}12\cdot 112=13$ см. Следовательно, к началу первого полива $H=238+13-3=248$ см, а запасы влаги в активном слое почвы $W=0{,}7W_{нв}$.

Поскольку к 3 июня мощность активного слоя почвы $h<50$ см (см. рис. 31), за норму первого вегетационного полива принимаем нижний предел оптимальной разовой водоподачи, равный $m=1200$ м³/га (брутто). Если продолжительность такта полива принять равной 2 суткам, то наивысшее положение УГВ наступит 5 июня, т. е. спустя сутки после прекращения водопо-

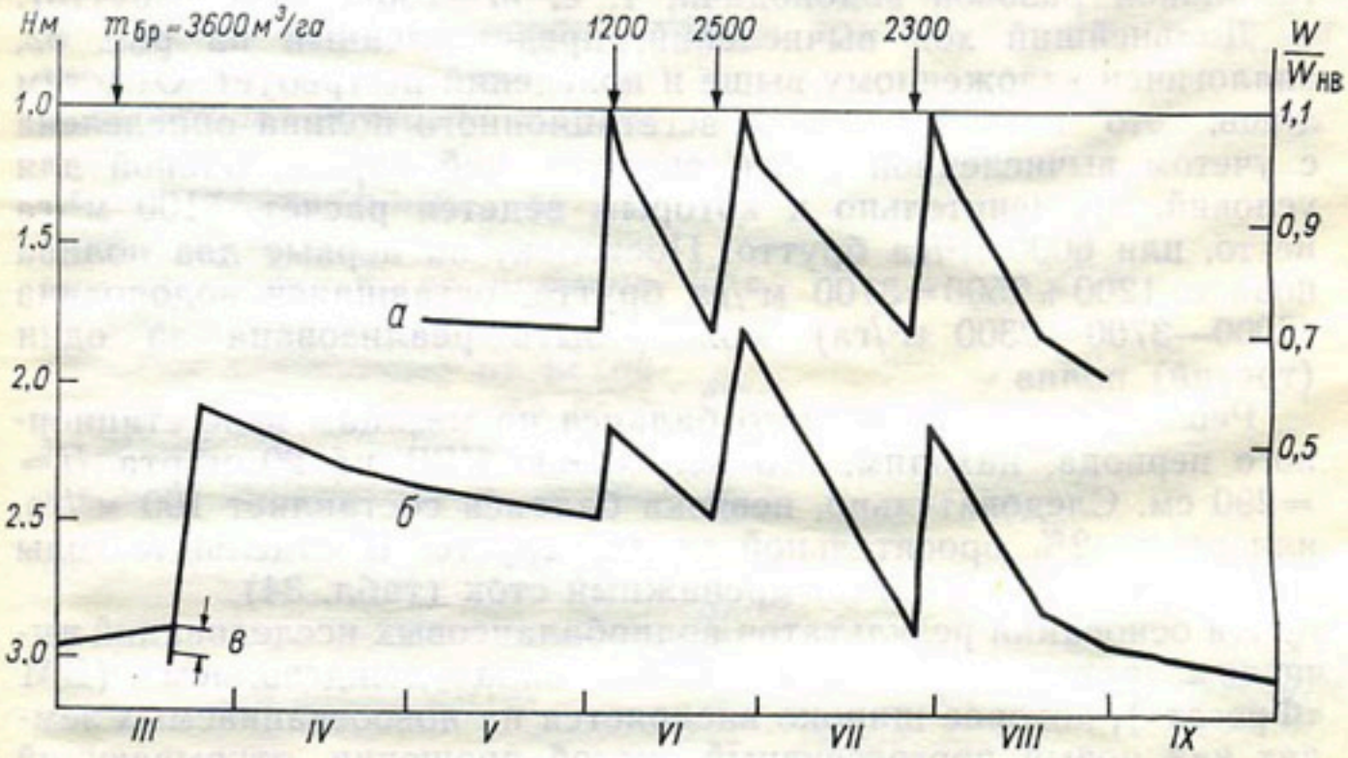


Рис. 32. Вариант режима орошения хлопчатника по бороздам в V гидромодульном районе зоны Ц-II.

а — динамика влажности активного слоя почвы, *б* — динамика глубины УГВ, *в* — невязка баланса.

дачи. Об этом свидетельствуют результаты учащенных наблюдений за динамикой УГВ во время полива и в первые дни после его прекращения (см. рис. 4).

При исходной глубине УГВ $H_н=248$ см подъем грунтовых вод к 5 июня составит $\mu\Delta H_↑=0{,}265\cdot 120=32$ см, а их уровень установится на глубине $H=248-32=216$ см.

Влажность почвы к концу полива, согласно рис. 11, будет $W=1{,}1W_{нв}$, и на сток гравитационной воды при $H=216$ см понадобится 3 дня (см. рис. 29), после чего влажность активного слоя почвы снизится до наименьшей влагоемкости.

Продолжительность межполивного интервала, т. е. период, за который влажность почвы сработается до нижнего предела оптимального увлажнения, рассчитываем по уравнению (62), из которого следует, что при $H_н=216$ см $T=16$ сут. Тогда с учетом

3 суток на сток гравитационной воды второй вегетационный полив назначаем на 8 июня + 16 сут. = 24 июня.

За межполивной интервал $I = 0{,}35$ и $E = 90$ мм. Следовательно, $\mu \Delta H_{\downarrow} = 0{,}35 \cdot 90 = 31$ см и к началу второго полива $H = 216 + 31 = 247$ см.

Запасы влаги в почве, сформировавшиеся в результате второго вегетационного полива, будут израсходованы в период цветения хлопчатника, когда потребность растений в воде и интенсивность суммарного испарения наибольшие. Поэтому за норму второго вегетационного полива принимаем верхний предел оптимальной разовой водоподачи, т. е. $m = 2500$ м³/га (брутто).

Дальнейший ход вычислений, представленный на рис. 32, аналогичен изложенному выше и пояснений не требует. Отметим лишь, что норма третьего вегетационного полива определена с учетом вычисленной ранее оросительной нормы, равной для условий, применительно к которым ведется расчет, 5100 м³/га нетто, или 6000 м³/га брутто. Поскольку за первые два полива подано 1200 + 2500 = 3700 м³/га брутто, оставшаяся водоподача (6000—3700 = 2300 м³/га) может быть реализована за один (третий) полив.

Решая уравнение водного баланса по месяцам невегетационного периода, находим, что положение УГВ на 20 марта $H = 290$ см. Следовательно, невязка баланса составляет 100 м³/га, или около 2% оросительной нормы брутто. В отдельные годы такого размера достигает дренажный сток (табл. 34).

На основании результатов воднобалансовых исследований вычислим режим орошения хлопчатника дождеванием (ДМ «Фрегат»), которое широко внедряется на новоосваиваемых землях как новый прогрессивный способ орошения, открывающий широкие возможности полной автоматизации полива.

Для удобства расчетов допустим, что влагозарядковый полив и в этом случае завершился 25 марта, но УГВ в результате влагозарядки поднялся до отметки 300 см и потому грунтовые воды не принимают сколько-нибудь заметного участия в водном режиме и балансе активного слоя почвы в течение всего периода вегетации хлопчатника.

Дата первого полива останется, очевидно, той же, поскольку изменение влажности верхнего горизонта зоны аэрации за период от всходов до полива определяется главным образом испаряемостью и слабо зависит от положения УГВ (см. рис. 9).

Пренебрегая в первом приближении дренажным стоком, запишем уравнение водного баланса активного слоя почвы в виде

$$m_{н} - V = E, \qquad (64)$$

т. е. поливная (оросительная) норма нетто за вычетом потерь воды на фильтрацию в глублежащие горизонты почвогрунта V целиком расходуется на суммарное испарение.

Если под потерями на фильтрацию понимать разность между водоподачей за полив и приращением влагозапасов во всей зоне аэрации, то при ее мощности 3—4 м $V \approx 0{,}2\,m$ (см. рис. 2). Тот же результат можно получить по формуле (18), учитывающей механический состав почвогрунтов. Однако эти данные соответствуют бороздковому орошению, когда поливные нормы в 2—3 раза выше подаваемых дождевальными агрегатами, применительно к которым оценка фильтрационных потерь воды за пределы активного слоя почвы переменной мощности представляется затруднительной.

Определение, хотя бы ориентировочно, величины V приведет к необходимости изменять размеры поливных норм, вычисленные по мощности активного слоя почвы, который в условиях дождевания приобретает более определенный физический смысл, чем при бороздковом орошении, когда промачиванию подвергается вся зона аэрации независимо от исходной мощности активного слоя. В то же время суммарное испарение формируется из потерь влаги не только активным, но и всем промоченным в результате фильтрации слоем почвы, причем доля активного слоя в суммарном испарении при глубоком залегании УГВ составляет 80—85% [166]. Исходя из этих данных, можно соответствующим образом корректировать измеренные или рассчитанные суммы испарения, не изменяя размеры поливных норм.

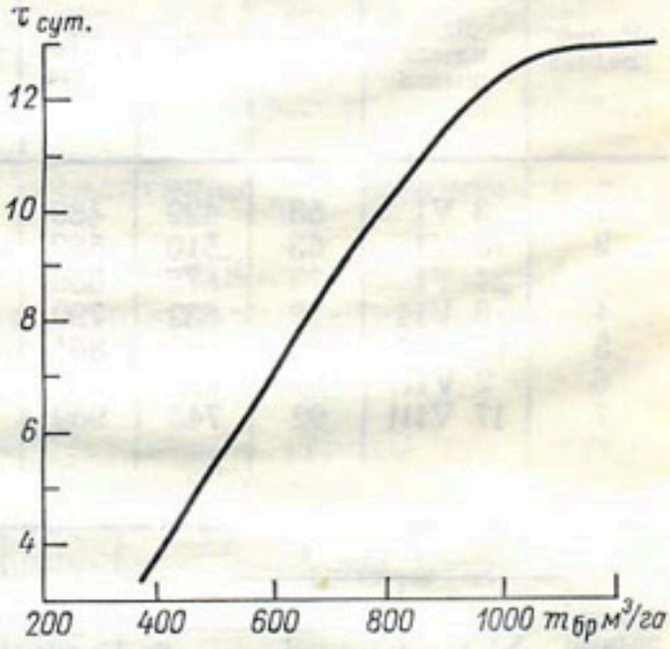


Рис. 33. Связь продолжительности одного оборота ДМ «Фрегат» с поливной нормой брутто.

Поясним ход расчетов на примере (табл. 35). На дату первого полива по графику на рис. 31 определяется мощность активного слоя почвы h. Принимая далее $W_{НВ}=27\%$ объема, вычисляем по уравнению (59) поливную норму нетто, равную 429 м³/га.

Для определения поливной нормы брутто воспользуемся результатами оценки потерь воды при дождевании машиной «Фрегат» на испарение в воздухе, снос ветром и перехват хлопчатником (см. табл. 33). С учетом этих данных, а также допуская возможность круглосуточного орошения, принимаем коэффициент перехода от водоподачи нетто к брутто равным в июне 1,14, в июле 1,25 и в августе 1,30. Тогда поливная норма брутто на первый полив равна $429 \cdot 1{,}14 = 489$ м³/га.

По данным о водоподаче брутто определяется продолжительность одного цикла (круга), которая относительно исходного сектора орошения является продолжительностью межполивного интервала τ. Для этого используется связь $\tau = f(m_{бр})$, представленная на рис. 33 и полученная на основании зависимости поливной нормы от скорости движения концевой тележки.

Таблица 35

Вариант режима орошения хлопчатника дождевальной машиной «Фрегат» при глубине УГВ 3—4 м

Номер полива	Дата начала полива	h см	$m_н$ м³/га	$m_{бр}$ м³/га	После полива		τ сут.	Дата конца полива
					W мм	$\frac{W}{W_{НВ}}$		
1	3 VI	53	429	489	143	1,00	6	8 VI
2	13 VI	63	510	582	170	1,00	7	19 VI
3	24 VI	71	575	656	192	1,00	8	1 VII
4	6 VII	78	632	790	211	1,00	10	15 VII
5	19 VII	85	688	861	230	1,00	11	29 VII
6	2 VIII	89	721	937	240	1,00	12	13 VIII
7	17 VIII	92	745	969	248	1,00	12	28 VIII

Номер полива	Период τ			$W_{ВРК}$ мм	Период стоянки				Невязка баланса, мм
	$\sum_{i=1}^{\tau} E_i$	W_τ			ΔW мм	E мм/сут.	t сут.	дата конца стоянки	
		мм	$W_\tau / W_{НВ}$						
1	24,0	119	0,83	100	19	4,3	4	12 VI	1,7
2	32,2	138	0,81	119	19	4,6	4	23 VI	0,4
3	38,4	154	0,80	134	20	4,8	4	5 VII	—0,1
4	50,0	161	0,76	148	13	5,0	3	18 VII	—1,8
5	53,9	176	0,77	161	15	4,8	3	1 VIII	0,5
6	56,4	184	0,77	168	16	4,6	3	16 VIII	1,9
7	50,4	198	0,80	174	24	3,8	6	3 IX	—1,3

Итого за период 3 июня — 3 сентября

Оросительная норма нетто 4300 м³/га.
Оросительная норма брутто 5284 м³/га.
Суммарное испарение с активного слоя почвы, м³/га:
за период τ 3050,
за период стоянки 1210,
за весь период 4260.
Продолжительность работы машины 66 сут.
Продолжительность стоянки 27 сут.
Коэффициент использования времени 0,71.
Невязка водного баланса 40 м³/га.

При $m_{бр}=489$ м³/га $\tau=6$ сут., следовательно, первый цикл (оборот) завершится 3 июня+6=8 июня.

Расчет влажности активного слоя почвы ведется для исходного сектора орошения на основании соответствия интенсивности дождя впитывающей способности почвы. Тогда после полива исходного сектора $W=W_{НВ}=143$ мм в слое почвы 0—53 см (см. рис. 31). К концу межполивного интервала запас влаги уменьшится на сумму испарения за период τ и составит $W_к=143—24=119$ мм, или 0,83 $W_{НВ}$.

Поскольку очередной полив назначается при сработке влагозапасов до $W=0{,}7\ W_{НВ}=W_{ВРК}$ (100 мм), машина останавливается на период, за который сработка составит $\Delta W=119—100=19$ мм. При среднесуточном испарении 4,3 мм продолжительность периода стоянки $t=\Delta W/E\approx4$ сут., а дата конца стоянки 8 июня+4=12 июня. Следующий день является датой начала второго полива.

Дальнейший ход вычислений аналогичен изложенному и пояснений не требует.

В целом за поливной период продолжительность работы, стоянки машины и коэффициент использования времени отвечает результатам специальных ресурсных испытаний «Фрегата» [73].

Для того чтобы убедиться в отсутствии угрозы систематического засоления активного слоя почвы, рассчитаем годовую оросительную норму по уравнению (57) при тех же входных параметрах, но принимая среднюю годовую глубину УГВ равной 350 см и среднюю мощность активного слоя 70 см и допуская равенство испарения в невегетационный период на полях, орошаемых по бороздам и дождеванием. Расчет показывает, что допустимая концентрация почвенного раствора (3,15 г/л) не будет превышена, если годовая водоподача составит 8250 м³/га. Тогда норма влагозарядкового полива будет равна 8250—4300=3950 м³/га.

В следующем примере допустим, что влагозарядка к 25 марта подняла УГВ до отметки 200 см и, следовательно, грунтовые воды принимают участие в водном режиме и балансе активного слоя почвы.

По аналогии с бороздковым орошением (при тех же суммах атмосферных осадков и испарения за период от посева до первого полива) найдем, что к началу первого вегетационного полива (3 июня) грунтовые воды сработаются до $H=234$ см. Дальнейший ход расчетов удобно вести в табличной форме (табл. 36).

Мощность активного слоя почвы на конкретную дату периода вегетации определяется по кривой на рис. 31, соответствующей глубине УГВ 2—3 м, после чего, так же как и в предыдущем примере, вычисляются поливные нормы нетто и брутто, а также продолжительность периода τ.

Таблица 36

Вариант режима орошения хлопчатника дождевальной машиной «Фрегат» при глубине УГВ 2—3 м

Номер полива	Дата начала полива	h см	$m_н$ м³/га	$m_{бр}$ м³/га	$H_н$ см	После полива				τ сут.	Дата конца полива
						$\mu\,\Delta H_{\downarrow}$ см	$H_к$ см	W мм	$W/W_{НВ}$		
1	3 VI	42	350	399	234	1	233	113	1,00	4	6 VI
2	11 VI	48	400	456	239	1	238	130	1,00	5	15 VI
3	19 VI	55	459	523	243	1	242	149	1,00	6	24 VI
4	27 VI	61	509	580	243	2	241	165	1,00	7	3 VII
5	11 VII	68	532	665	275	1	274	184	1,00	8	18 VII
6	22 VII	72	589	736	290	0	290	194	1,00	7	28 VII
7	2 VIII	75	608	790	298	0	298	202	1,00	10	11 VIII
8	13 VIII	78	632	821	300	0	300	211	1,00	11	23 VIII

Номер полива	Период τ							
	l_1	$\sum_{i=1}^{\tau} E_i$	$\mu\,\Delta H_{\downarrow}$ см	H_τ см	$W_к$ мм	$W_к/W_{НВ}$	$W_{ВРК}$ мм	ΔW мм
1	0,17	19,2	3,3	236	97,1	0,86	79,1	18,0
2	0,12	28,0	3,4	241	105	0,81	91,0	14,0
3	0,04	34,8	1,4	243	116	0,78	104	12,0
4	0,46	42,0	19,3	260	142	0,86	116	26,0
5	0,25	50,4	12,6	287	146	0,79	129	17,0
6	0,13	42,7	5,6	296	157	0,81	136	21,0
7	0,03	59,0	1,8	300	145	0,72	141	4,0
8	0,00	61,6	0,0	300	149	0,71	148	1,0

Номер полива	Период стоянки					$\mu\,\Delta H_{\downarrow} t$ см	H см	Невязка баланса, мм
	l_2	E мм/сут.	$\mu\,\Delta H_{\downarrow}$ см/сут.	t сут.	дата конца стоянки			
1	0,16	5,2	0,8	4	10 VI	3,2	239	—0,5
2	0,11	5,8	0,6	3	18 VI	1,8	243	1,2
3	0,02	6,0	0,1	2	26 VI	0,2	243	—0,3
4	0,36	6,1	2,2	7	10 VII	15,4	275	1,1
5	0,15	6,2	0,9	3	21 VII	2,7	290	1,5
6	0,07	6,0	0,4	4	1 VIII	1,6	298	—0,6
7	0,00	5,7	0,0	1	12 VIII	0,0	300	2,8
8	0,00	5,0	0,0	1	24 VIII	0,0	300	3,4

Итого за период 3 июня — 24 августа

Оросительная норма нетто 4079 м³/га.
Оросительная норма брутто 4970 м³/га.
Суммарное испарение, м³/га:
за период τ 3380,
за период стоянки 1460,
за весь период 4840.

Продолжительность работы машины 58 сут.
Продолжительность стоянки 25 сут.
Коэффициент использования времени 0,70.
Невязка водного баланса 91 м³/га.

Для оценки подъема УГВ в результате полива рекомендуется использовать зависимость приращения запасов грунтовых вод от атмосферных осадков (см. рис. 5), причем в данном случае рабочей является нижняя кривая этой зависимости, соответствующая продолжительности бездождного интервала более 10 суток. Зависимость на рис. 5 применяется и в случаях, когда продолжительность периода τ в совокупности со временем стоянки машины составляет менее 10 суток, поскольку очередной полив назначается при иссушении активного слоя почвы до величины, наблюдающейся обычно при максимальной продолжительности бездождного интервала.

При исходной глубине УГВ 2—3 м и $m_н = 400 \div 600$ м³/га подъем грунтовых вод в результате полива составляет всего 1—2 см, что в большинстве случаев подтверждается фактическими наблюдениями (см. рис. 3).

Нередки, однако, случаи чередования участков, орошаемых дождеванием, с массивами, полив которых осуществляется по бороздам значительно более высокими нормами. Тогда при вероятном совпадении сроков поливов подъем УГВ на участке под «Фрегатом» будет определяться не столько инфильтрацией осадков, сколько растеканием бугра грунтовых вод, сформировавшимся под соседним орошаемым по бороздам массивом. Величина такого растекания является важным элементом водного баланса зоны аэрации и в первом приближении может быть оценена по формуле (18). Но в данном примере, равно как и в предыдущем, предполагается групповое использование дождевальных машин, при котором влиянием соседних полей с иным способом орошения можно пренебречь.

В табл. 36, данные которой более наглядны в графическом изображении (рис. 34), учтена доля грунтовых вод в суммарном испарении I, но величина I_1 определяется по изложенным выше методам при глубине УГВ, сформировавшейся к концу полива исходного сектора $H_к$, а I_2 — при глубине УГВ на конец межполивного интервала H_τ.

Продолжительность стоянки машины, т. е. число дней, необходимое для уменьшения запасов влаги активного слоя почвы на величину $\Delta W = W_к - W_{врк}$, рассчитывается по формуле

$$t = \frac{\Delta W}{E - \mu \Delta H_\downarrow}$$

с округлением результата до целых суток.

Дальнейший ход вычислений пояснений не требует.

В этом примере число поливов равно 8 против 7 в предыдущем, но из-за снижения мощности активного слоя почвы сократились размеры поливных норм, а оросительная норма нетто, несмотря на большее число поливов, снизилась примерно на 5%. Если принять мощность активного слоя почвы независимой от

глубины УГВ, то число поливов будет тем больше, чем глубже залегают грунтовые воды.

По сравнению с бороздковым орошением при том же диапазоне колебания глубин УГВ оросительная норма нетто (вегетационная) на участке дождевания на 20% ниже, что соответствует данным Ф. Н. Саттарова и М. П. Медниса [216] применительно к условиям глубокого залегания грунтовых вод. Однако указание тех же авторов о возможности снижения в 2—3 раза

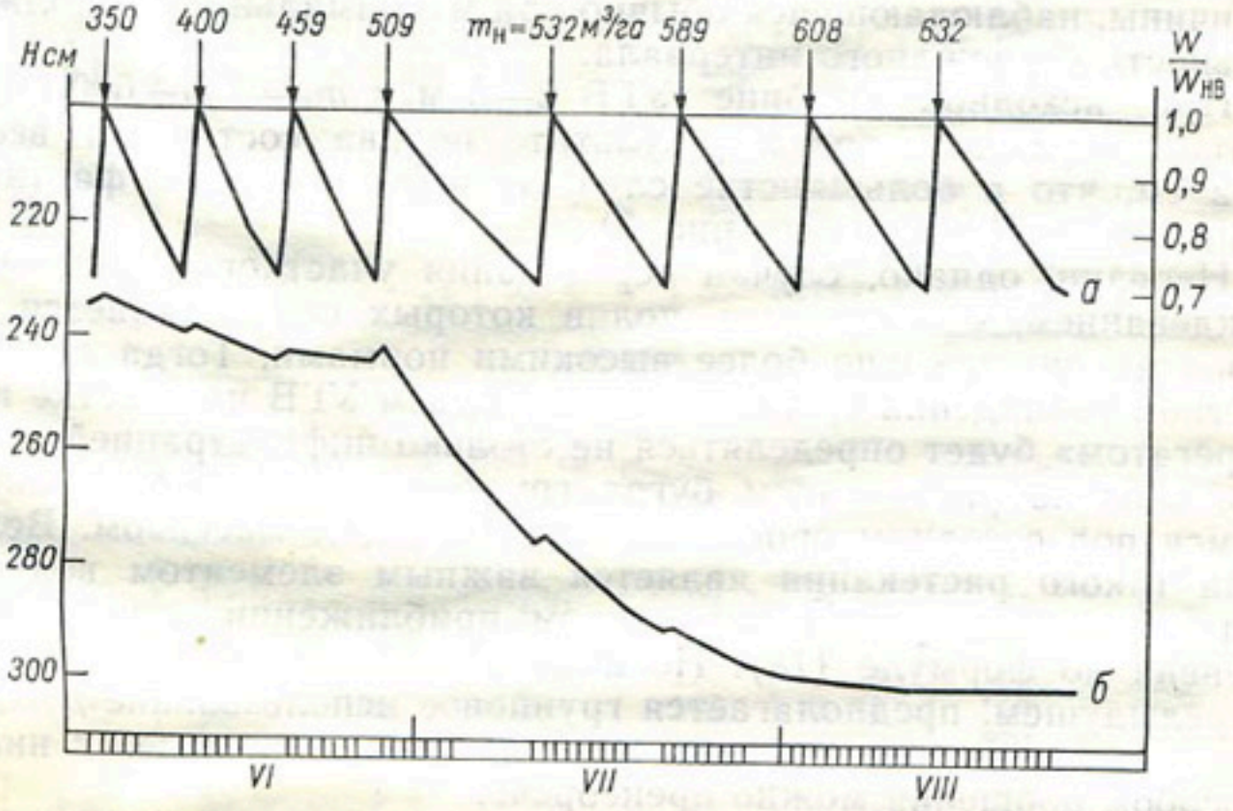


Рис. 34. Вариант режима орошения хлопчатника дождевальной машиной «Фрегат» при глубине УГВ 2—3 м.

Штриховкой отмечен период работы машины. Остальные обозначения см. рис. 32.

затрат оросительной воды при дождевании хлопчатника в условиях близкого залегания грунтовых вод воднобалансовыми расчетами не подтверждается.

Зависимость оросительной нормы на участках дождевания хлопчатника от глубины стояния УГВ можно определить методом последовательных расчетов режима орошения, задаваясь различной глубиной УГВ на начало поливного периода $H_н$. При этом для каждого варианта нужно вычислить годовую оросительную норму, исходя из необходимости поддержания оптимальной концентрации почвенного раствора в активном слое с учетом зависимости его мощности от положения грунтовых вод.

Результаты расчетов по изложенной выше методике показывают (рис. 35), что при погружении грунтовых вод от 100 до 200 см оросительная норма (вегетационная) возрастает

в 1,6 раза, но дальнейшее снижение УГВ до отметки 300—350 см влечет за собой лишь незначительное (около 10%) увеличение затрат воды в период вегетации и хлопчатника.

Размер водоподачи в холодное полугодие, определенный как разность между годовой и вегетационной оросительной нормой, характеризуется обратным ходом. Поэтому применительно к годовому отрезку времени экономия оросительной воды отсутствует и положение грунтовых вод определяет лишь характер рас-

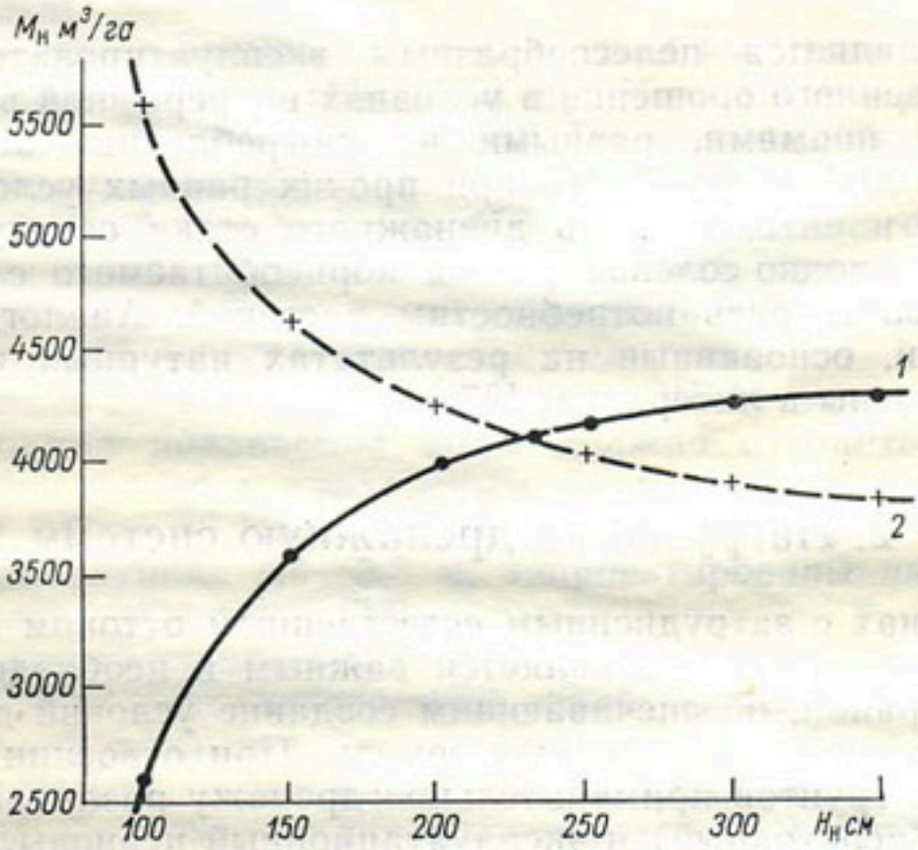


Рис. 35. Зависимость оросительной нормы вегетационного (*1*) и невегетационного (*2*) периодов от начальной глубины УГВ.

пределения общей оросительной нормы во времени. Например, при глубине УГВ 100—150 см летом подается 32—44% годовой водоподачи, а зимой 56—68%. Начиная с глубины УГВ около 200 см объемы водоподачи в теплое и холодное полугодия примерно равны. Этот вывод подтверждается многолетними натурными наблюдениями на орошаемых массивах под хлопчатником [108].

Следует отметить, что уравнение (57), с помощью которого вычислена годовая оросительная норма, не учитывает размеры поливных норм и сроки проведения поливов, в связи с чем кривая *2* на рис. 35, равно как и результаты вычислений нормы влагозарядки в примере с бороздковым поливом, соответствуют указанным вариантам режима орошения. Для существенно иных вариантов размер необходимой водоподачи может быть

уточнен путем оценки накопления солей по отдельным периодам года [199].

Значительная экономия оросительной воды независимо от глубины УГВ может быть достигнута применением внутрипочвенного способа орошения, при котором исключаются потери на сброс и испарение поливной воды в процессе полива. К тому же в этом случае имеет место депрессия физического испарения и общее водопотребление хлопчатника по сравнению с бороздковым орошением снижается на величину порядка 10% (см. главу 4).

Представляется целесообразным эксплуатировать систему внутрипочвенного орошения в условиях непрерывной водоподачи суточными нормами, равными водопотреблению хлопчатника в сумме с дренажем. Тогда при прочих равных условиях глубина УГВ и интенсивность дренажного стока останутся неизменными, а водно-солевой режим корнеобитаемого слоя почвы будет удовлетворять потребностям растений. Аналогичные рекомендации, основанные на результатах натурных исследований, приведены в литературе [97].

2. Нагрузка на дренажную систему

В районах с затрудненным естественным оттоком грунтовых вод дренажная система является важным и необходимым звеном мелиорации, обеспечивающим создание условий для устойчивого опреснения засоленных земель. При освоении первично засоленных грунтов применительно к дренажу различают мелиоративный (переходный) и эксплуатационный периоды, в течение которых задачи дренажных систем существенно различны [112].

Систематический дренаж проектируют обычно на эксплуатационный период, а в переходный период он может быть усилен временным дренажем.

При наличии хорошо водопроницаемого слоя, гидравлически связанного с зоной аэрации, когда можно откачивать избыточные грунтовые воды, применяют вертикальный дренаж. На новоосваиваемых землях Голодной степи, где впервые в отечественной практике дренаж получил широкое распространение, а также на других территориях преобладают условия для строительства закрытого горизонтального дренажа. Например, по подсчетам В. А. Духовного [79], из общей площади земель нетто, подкомандных Южно-голодностепскому каналу (252 тыс. га), горизонтальным дренажем занято около 85% земель, а вертикальным всего 15%.

При прочих равных условиях эффективность дренажа определяется фактической нагрузкой на дренажную систему и распределением этой нагрузки во времени. Но в силу многообразия геологических, гидрогеологических и хозяйственно-мелиоративных

факторов фактические данные, характеризующие интенсивность дренажного стока и его роль в водном балансе орошаемых земель, крайне неоднородны. Согласно данным табл. 34, закрытый горизонтальный дренаж глубиной заложения 3 м при междренных расстояниях 240 м отводит от 2 до 12% оросительной нормы, а в среднем (1971—1974 гг.) 6,9%. На том же участке грунтовые воды поднялись до уровня заложения дренажа в 1968 г. (на пятый год освоения), а в среднем за период 1968—1970 гг. дренажный сток составлял 8—12% оросительной нормы [218].

Коллекторно-дренажная сеть колхоза им. Ленина Джетысайского района отводит 10% [265], а в Чимбайском районе Каракалпакии 11,6% водоподачи [193]. По наблюдениям И. К. Дуюнова с сотрудниками [80], закрытые дрены глубиной 3,5—3,7 м при расстоянии между ними 450—500 м отводят от 8 до 35% суммы приходных статей водного баланса, причем малый дренажный сток авторы склонны объяснять плохой работой дрен, обусловленной недостатками строительства.

Изучение дренажа в Калифорнии (США) показало, что 10% всего объема подаваемой воды должно отводиться дренами, но применительно к конкретным фермам эта величина колеблется от 2,8 до 33,1%, а дрены, расположенные в гравелистых почвах на глубине 2,4—3,3 м, запроектированы на отвод 30—40% общей водоподачи [77].

В практике орошаемого земледелия дренажная сеть обычно объединяется с коллекторно-сбросной. Поэтому наличие в составе дренажного стока сбросных вод приводит к систематическому рассогласованию между теоретически рассчитанным слоем дренажного стока и данными натурных наблюдений. Доля сбросных вод, определенная по результатам специальных наблюдений, составляет от 22—28% [88] до 40—50% [146] общего объема стока, зафиксированного в коллекторно-дренажной сети.

В Каршинской степи, где традиционное маловодье определяет минимальные размеры сброса, оценить объем дренажного стока в замыкающих створах коллекторов столь же затруднительно, поскольку в период вегетации хлопчатника коллекторы в различные по водности годы перегораживаются земляными перемычками и используются в качестве источника орошения.

На рис. 36 приведен гидрограф дренажного стока коллектора «Южный», собирающего дренажные воды практически со всей территории первой очереди освоения Каршинской степи. Как видно, гидрограф характеризуется максимумом в весенние месяцы, когда с появлением воды в каналах повсеместно проводятся влагозарядковые поливы, и глубоким спадом летом, когда имеет место водозабор на орошение. Более подробные данные о режиме коллекторно-дренажного стока в Каршинской степи и его связи с водностью источника орошения приведены в работе [169].

Нагрузка на систематический дренаж (горизонтальный или вертикальный) может быть определена из уравнений водного баланса зоны аэрации и грунтовых вод, предложенных, в частности, С. Ф. Аверьяновым [6]. При всей обоснованности этого метода его практическое использование встречает ряд трудностей, связанных с оценкой тех элементов баланса, режим которых в должной мере не изучен, а методика учета в натурных условиях разработана недостаточно. В первую очередь это относится к горизонтальному притоку и оттоку грунтовых вод,

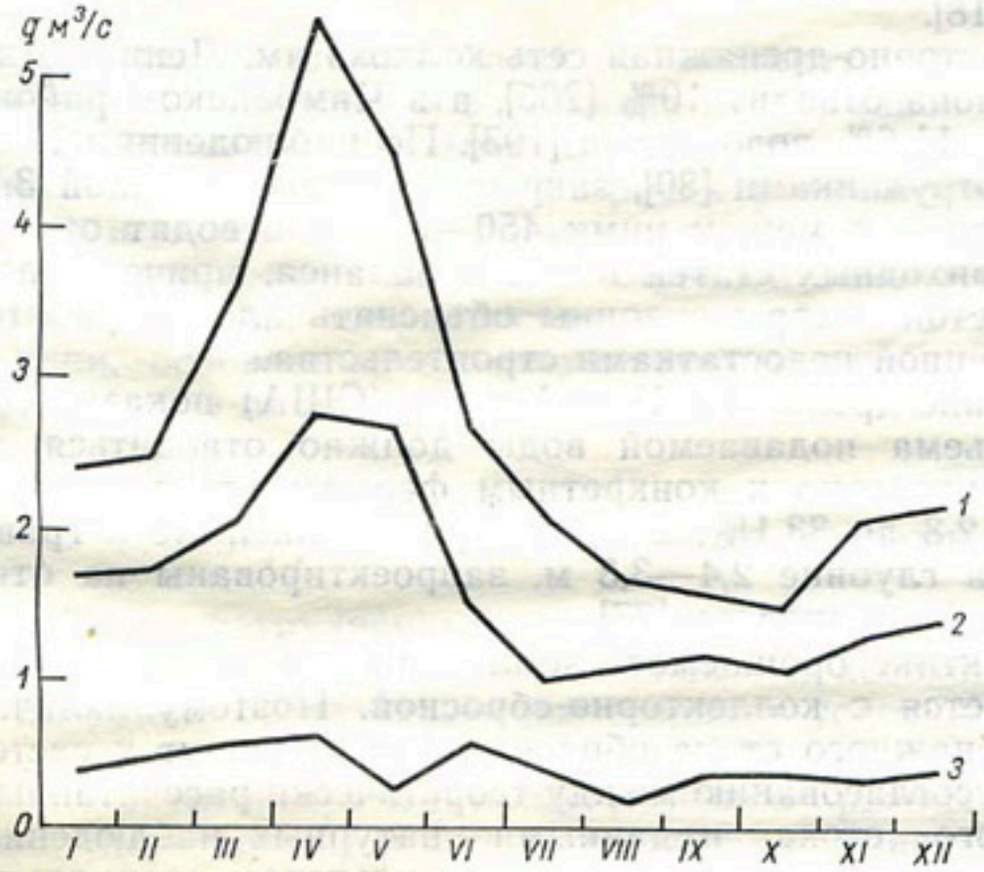


Рис. 36. Гидрограф дренажного стока по коллектору «Южный» (створ Мергенча) в многоводный (*1*), средний (*2*) и маловодный (*3*) годы.

влагообмену между напорными подземными и грунтовыми водами, фильтрационным потерям из оросительной сети, влагообмену между орошаемыми и неорошаемыми участками, а также между смежными массивами с различными почвенно-гидрологическими и гидрогеологическими условиями. Некоторыми из этих элементов зачастую пренебрегают, обосновывая малой невязкой баланса, свидетельствующей о том, что все включенные в уравнение элементы баланса учтены правильно, а не включенные действительно пренебрежимо малы. Однако ничтожно малая или даже нулевая невязка обеспечивается и при сколь угодно больших, но разнозначных погрешностях оценки элементов баланса, в связи с чем сама величина невязки не является достаточным условием правильности выполненных расчетов.

По предложению А. П. Вавилова, включенному в «Технические указания по проектированию горизонтального дренажа засоленных земель» [230], дренажный сток может быть выражен в виде функции глубины залегания УГВ:

$$q = A(h_{др} - h_{ср}), \tag{65}$$

где A — коэффициент, характеризующий дренированность территории и зависящий от местных условий, конструкции дрены и густоты дренажной сети, $h_{др}$ — действующая глубина дрены, равная разности отметок поверхности земли и уровня воды в дрене, $h_{ср}$ — средняя за рассматриваемый отрезок времени глубина стояния УГВ.

Параметры дренажа рассчитываются по формулам, подробный обзор и анализ которых выполнен В. М. Шестаковым [258]. Связь дренированности A в уравнении (65) с известной формулой В. М. Шестакова для расчета междренных расстояний в интерпретации Ф. В. Серебренникова [219] выглядит следующим образом:

$$A = \frac{10\,000}{B} \frac{T}{L_{нд} + 0{,}125B},$$

где B — междренные расстояния (м), T — суммарная проводимость водоносной толщи (м²/сут.), $L_{нд}$ — фильтрационное сопротивление на гидродинамическое несовершенство дренажа (м).

Уравнение (65) в общем подтверждается натурными данными (рис. 37), из которых следует, что применительно к условиям эксперимента в Голодной степи при напоре $h_{др}—h_{ср}=1$ м $q=A=5$ м³/га в сутки для закрытой горизонтальной дрены (совхоз № 1) и около 6 м³/га в сутки для открытого коллектора (совхоз № 18). Из многолетних наблюдений за работой двух соседних дрен на том же участке закрытого горизонтального дренажа А. Н. Морозов и Г. Н. Павлов [161] рекомендуют принимать $A=8$ м²/га в сутки.

На основании этих данных представляется возможным уточнить вычисленный в предыдущем разделе режим орошения хлопчатника с учетом закрытого горизонтального дренажа. В данном случае уточнение сводится к тому, что расчетная глубина УГВ формируется не только под действием поливов и сработки в зону аэрации, как предполагалось ранее, но и одновременно в результате работы дренажной системы. Тогда за период полива

$$\mu \Delta H_{\uparrow} = km - A(h_{др} - h_{ср}), \tag{66}$$

где k — доля поливной нормы, израсходованная на подъем УГВ. За межполивной интервал

$$\mu \Delta H_{\downarrow} = IE + A(h_{др} - h_{ср}). \tag{67}$$

Теперь возвратимся к варианту режима орошения хлопчатника по бороздам (см. рис. 32) и произведем повторный расчет с учетом уравнений (66) и (67). Ход вычислений аналогичен изложенному выше и потому нет необходимости вновь на нем останавливаться.

Результаты расчета показывают, что условия для второго полива наступают под влиянием дренажа на 3 суток, а для

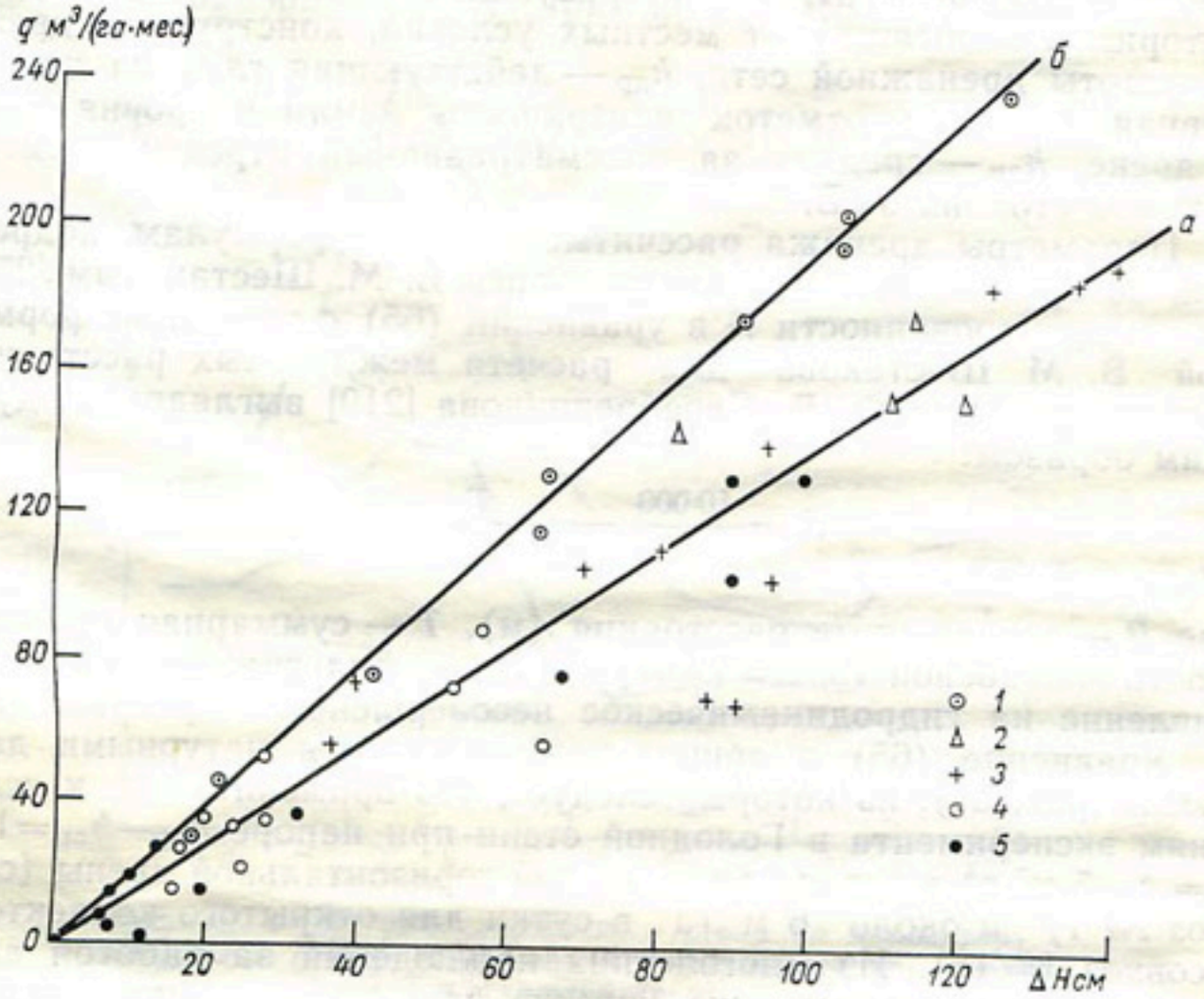


Рис. 37. Зависимость дренажного стока от напора в середине междренья ΔH.

а — закрытая горизонтальная дрена на глубине 3 м, *б* — открытый коллектор глубиной 4 м. *1* — 1968 г., *2* — 1971 г., *3* — 1972 г., *4* — 1973 г., *5* — 1974 г.

третьего полива на 12 суток раньше, чем в бездренажных условиях.

Если вариант с тремя поливами сохранить без изменений, то окажется, что поливной период завершится 17 июля и уже к 28 июля влажность активного слоя почвы опустится ниже ВРК. Поскольку в этом случае существует опасность подсушки хлопчатника, представляется более целесообразным вариант с четырьмя вегетационными поливами без изменения оросительной нормы (табл. 37). Тогда влажность активного слоя почвы опустится до ВРК 19 августа, а нагрузка на дренажную систему с учетом фактических напоров составит 9,1% годовой водоподачи

Таблица 37

Вариант режима орошения хлопчатника по бороздам на фоне закрытого горизонтального дренажа

Полив	Поливная норма (м³/га)		Межполивной интервал		
	нетто	брутто	начало	конец	Продолжительность (сутки)
Влагозарядка	3060	3600	25 III	3 VI	69
Вегетационный					
1	1000	1200	5 VI	21 VI	16
2	1350	1600	23 VI	10 VII	17
3	1750	2000	12 VII	1 VIII	22
4	1000	1200	3 VIII		
Оросительная норма за вегетацию	5100	6000			
Общая	8160	9600			

нетто в сумме с атмосферными осадками, или 12,4% оросительной нормы за вегетацию. При $A \leqslant 4$ м³/га в сутки режимы орошения, вычисленные для дренажных и бездренажных условий, практически совпадают.

Аналогичные расчеты могут быть выполнены и при орошении хлопчатника с помощью дождевальной машины «Фрегат», если использовать уравнение (67) как для периода работы машины, так и для времени ее стоянки. В качестве примера приведем результаты расчета при $H_н = 250$ см (табл. 38).

Таблица 38

Вариант режима орошения хлопчатника дождевальной машиной «Фрегат» на фоне закрытого горизонтального дренажа при $H_н = 250$ см

Вегетационный полив	Дата начала полива	Поливная норма (м³/га)		τ сут.	t сут.	$K = \frac{\tau}{\tau + t}$
		нетто	брутто			
1	3 VI	350	399	4	4	0,50
2	11 VI	400	456	5	3	0,63
3	19 VI	454	518	6	3	0,67
4	28 VI	499	569	7	3	0,70
5	8 VII	548	685	8	2	0,80
6	18 VII	581	726	9	1	0,90
7	28 VII	614	767	9	1	0,90
8	7 VIII	624	810	10	1	0,91
9	18 VIII	648	842	11	2	0,85
Оросительная норма		4718	5772	69	20	0,78

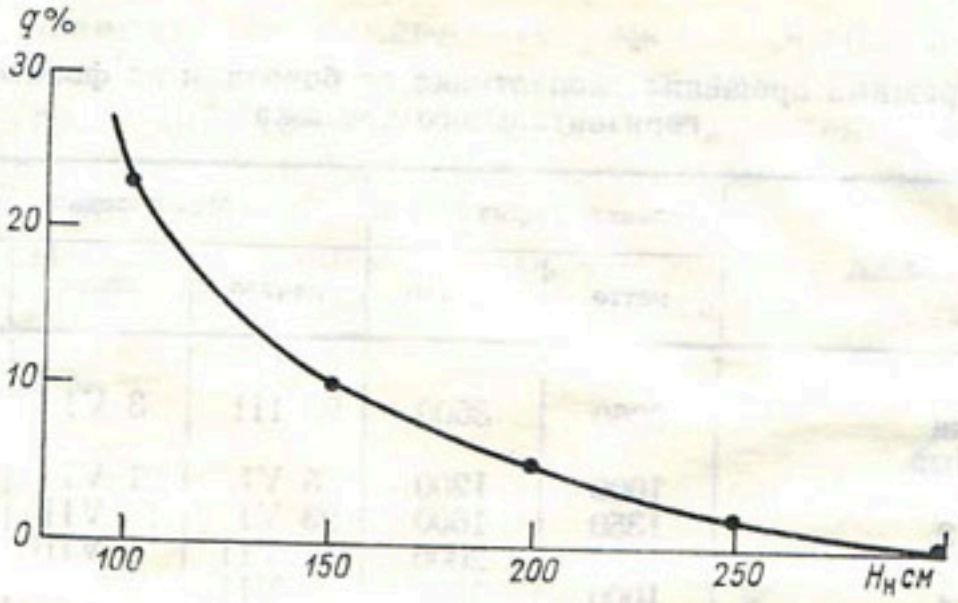


Рис. 38. Нагрузка на дренажную систему при орошении хлопчатника дождеванием (% от оросительной нормы) в зависимости от глубины УГВ на начало поливного периода.

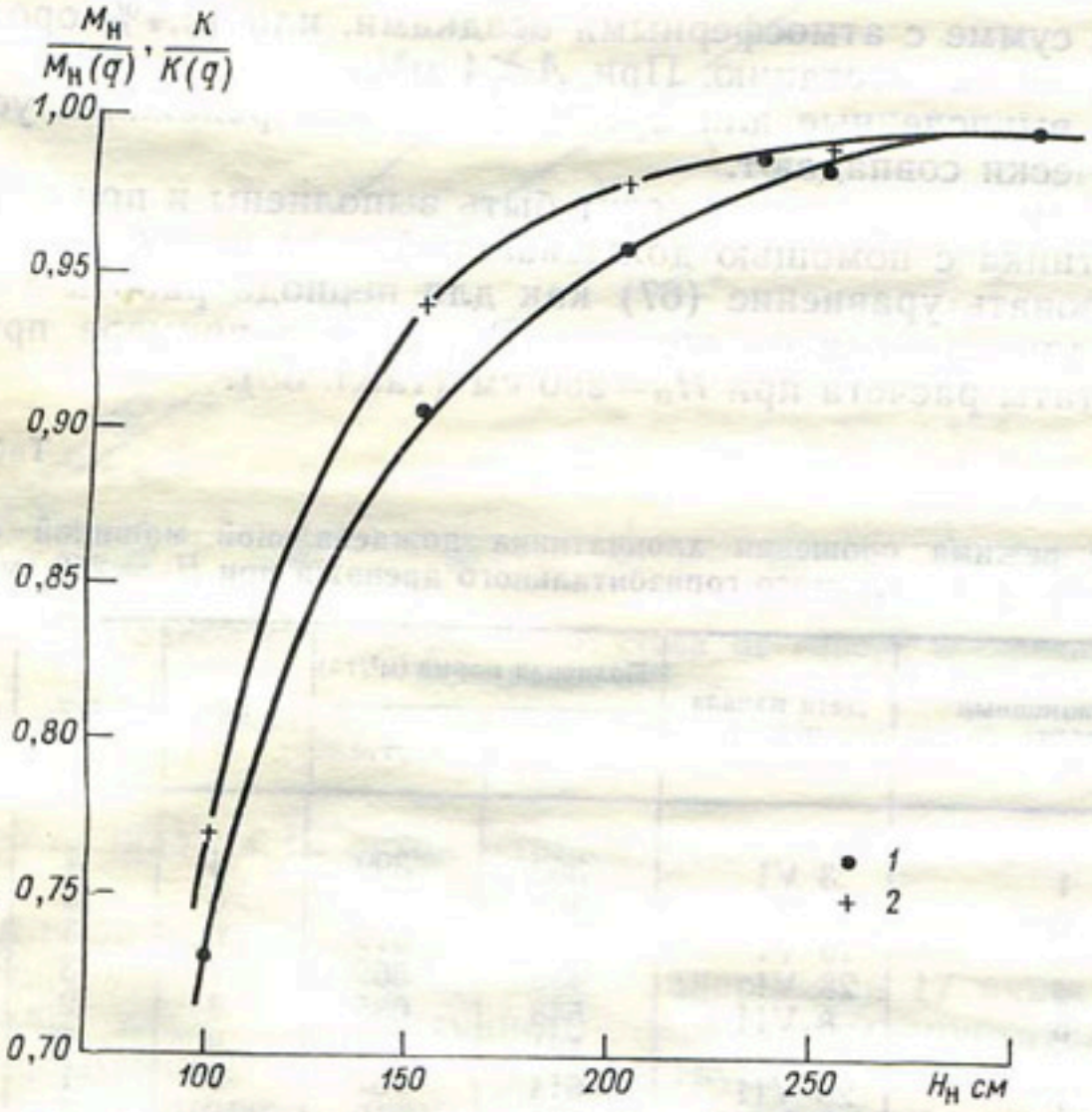


Рис. 39. Зависимость отношения оросительных норм нетто (*1*) и коэффициента использования времени работы ДМ «Фрегат» (*2*) в бездренажных и дренажных условиях от глубины УГВ на начало поливного периода.

В соответствии с уравнением (65) дренажный сток возрастает пропорционально увеличению напора над дреной. Поэтому, задавая различную глубину УГВ на начало поливов и выполняя вычисления, аналогичные представленным в табл. 36, но с учетом формул (66) и (67), можно получить зависимость нагрузки на дренажную систему от исходной глубины УГВ (рис. 38).

При $H_н < 200$ см действующая система заметно увеличивает вегетационную оросительную норму и коэффициент использования времени работы дождевальной машины в соответствии с величиной нагрузки на дренаж. Этот вывод следует из результатов вычислений режима орошения хлопчатника в дренажных и бездренажных условиях, на основании которых построен рис. 39. Сказанное в равной степени относится и к бороздковому орошению.

Если глубина УГВ колеблется в пределах 2—3 м в течение вегетации, то объем дренажного стока не выходит за пределы, указанные в табл. 34, и его влияние на размер оросительной нормы невелико.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение посевных площадей под хлопчатником за счет орошаемого земледелия имеет большое значение. Однако орошению нередко сопутствуют засоление и заболачивание земель, что приводит к значительному снижению их продуктивности, а иногда и к полному выпадению из севооборота.

Отрицательные последствия орошения и освоения новых земель настоятельно диктуют необходимость полнее учитывать возможные изменения структуры водного и солевого балансов зоны аэрации в связи с освоением земель, обосновывать режим орошения, норму осушения и параметры дренажа применительно к каждому комплексу конкретных природных условий. Между тем экспериментальный материал, необходимый для решения этой задачи, крайне ограничен, а разнородная методика натурных наблюдений осложняет их обработку и обобщение даже в границах одной и той же мелиоративной области.

По-видимому, назрела необходимость разработки научно обоснованных методов размещения сети агрометеорологических станций системы Гидрометслужбы на землях нового освоения. К числу задач сети станций следует отнести систематическое изучение условий формирования и закономерностей пространственного распределения основных элементов водно-солевого баланса орошаемых земель, на основе чего может вестись оперативная корректировка режимов орошения хлопчатника и других культур с учетом текущих гидрометеорологических и гидрогеологических условий.

Пока этих сведений недостаточно, поэтому имеющийся экспериментальный материал приобретает значительную ценность при оценке объема необходимых изыскательских работ и как способ обоснованной корректировки проектных решений.

В настоящей книге обобщены результаты многолетних наблюдений за режимом влажности зоны аэрации, глубины грунтовых вод, суммарного испарения и его составляющих при орошении хлопчатника по бороздам, дождеванием и способом внутрипочвенного орошения. При этом основное внимание уделено поискам оптимальных зависимостей, позволяющих количественно оценить указанные элементы водного баланса как в период поливов, так и в межполивные интервалы.

В процессе исследований подтвердился интегральный характер каждого из элементов водного баланса зоны аэрации, формирующегося в результате одновременного влияния совокупно-

сти других элементов на фоне меняющихся гидрометеорологических условий. Так, ирригационная водоподача сопровождается соответствующим изменением влажности почвы, глубины залегания грунтовых вод, величины и структуры суммарного испарения. В межполивные интервалы сработка влагозапасов неразрывно связана с испарением и транспирацией, глубиной уровня грунтовых вод и дренажным стоком, причем в период поливов и в межполивные интервалы интенсивность этих процессов при прочих равных условиях может заметно изменяться под влиянием напряженности текущих метеорологических факторов.

Хотя столь тесная взаимосвязь процессов, происходящих в диалектически единой системе грунтовые воды—почва—растение—атмосфера, обоснована теоретически и постоянно подтверждается в натуре, задача широкого обобщения совокупности разнозначных процессов в форме, удобной для практического использования, решена еще далеко не полностью. В то же время прикладной характер воднобалансовых исследований диктует необходимость установления среди совокупности аргументов наиболее значимых с целью получения наибольшей информации об элементах водного баланса на основе минимальных и легкодоступных данных.

На современном этапе воднобалансовых исследований в качестве таких аргументов могут быть выбраны глубина залегания уровня грунтовых вод и испаряемость. Первый из них, наряду с динамикой минерализации, является важнейшим фактором, характеризующим мелиоративное состояние земель и потому систематически контролируется. Второй может рассматриваться как некоторый индекс, изменение которого пропорционально изменению всего комплекса метеорологических параметров.

Естественно, такая постановка задачи определила как содержание книги, так и характер ее построения.

Рассматривая процесс влагообмена грунтовых вод с зоной аэрации, автор задавался целью определить основные закономерности колебания глубины уровня грунтовых вод под орошаемым полем, используя в качестве аргументов размер поливной нормы, исходное положение грунтовых вод и фазу развития хлопчатника.

В известных условиях глубина залегания уровня грунтовых вод определяет общие запасы влаги зоны аэрации, равно как и интенсивность их сработки в межполивные интервалы. Но дефицит влажности верхних горизонтов почвы в начале вегетации формируется главным образом под влиянием испаряемости, физический смысл которой существенно расширяется и усложняется, если рассматривать испаряемость не только как функцию свойств приземного слоя атмосферы, но и характера подстилающей поверхности.

Хотя между декадными или месячными величинами суммарного испарения и глубиной уровня грунтовых вод имеет место невысокая корреляция, глубина грунтовых вод, осредненная за вегетационный период, тесно связана с коэффициентом испарения. Такая зависимость свидетельствует об отсутствии в реальных прозводственных условиях прогрессивного нарастания суммарного испарения по мере приближения грунтовых вод к поверхности почвы.

Выше и ниже оптимальной глубины грунтовых вод, равной в условиях эксперимента 2—3 м, водопотребление хлопчатника снижается, хотя и с различной интенсивностью.

Для анализа зависимости суммарного испарения от определяющих его факторов и получения региональных расчетных уравнений использован метод множественной корреляции, который в последнее время получил широкое распространение. При всех достоинствах этого метода следует учитывать ограниченный характер полученных с его помощью статистических моделей.

Процессы формирования элементов водного баланса орошаемого поля изменчивы не только во времени, но и по площади. Учет этого обстоятельства и результатов количественной оценки пространственной изменчивости глубины залегания уровня грунтовых вод и влажности различных горизонтов почвы должны способствовать оптимальному назначению объемов изыскательских работ под проекты орошения и освоения новых земель.

Результаты воднобалансовых исследований послужили основой для расчетов оросительных норм, сроков и норм вегетационных поливов хлопчатника при бороздковом орошении и дождевании. На конкретных примерах показана возможность обоснования режима орошения в дренажных и бездренажных условиях применительно к конкретному гидромодульному району.

Однако создание комплексной сети воднобалансовых агрометеорологических станций и накопление достаточного объема экспериментального материала позволит определить новые или уточнить существующие характеристики элементов водного баланса зоны аэрации орошаемых земель. Тем самым откроются широкие возможности для объективного районирования структуры водного баланса, режимов орошения хлопчатника и других сельскохозяйственных культур в условиях различной оросительной сети, разных дренажных устройств, техники орошения и способов водоподачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова М. М. Передвижение воды в почве при испарении.— «Тр. Почв. ин-та им. Докучаева», 1953, т. 61, с. 71—145.

2. Абрамова М. М. О передвижении парообразной влаги в почве.— «Почвоведение», 1963, № 10, с. 49—63.

3. Аверьянов А. П. Поливная норма и потери воды при орошении.— «Почвоведение», 1972, № 9, с. 95—100.

4. Аверьянов С. Ф. Приближенная оценка роли фильтрации в зоне «капиллярной каймы».— «ДАН СССР», 1949, т. 69, вып. 3, с. 309—312.

5. Аверьянов С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод.— В кн.: Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 87—447.

6. Аверьянов С. Ф. Некоторые вопросы предупреждения засоления орошаемых земель и меры борьбы с ним в Европейской части СССР.— В кн.: Орошаемое земледелие в Европейской части СССР. М., «Колос», 1965, с. 90—151.

7. Агроклиматический справочник по Узбекской ССР, вып. 2. Л., Гидрометеоиздат, 1967. 267 с.

8. Айдаров И. П. Исследование суммарного испарения пухлых солончаков на опытном участке в Таджикской ССР.— «Тр. ГГИ», 1968, вып. 151, с. 72—77.

9. Айдаров И. П. К вопросу обоснования режима орошения и параметров дренажа на засоленных или склонных к засолению землях.— В кн.: Теория и практика борьбы с засолением орошаемых земель. М., «Колос», 1971, с. 71—81.

10. Айдаров И. П., Каримов Э. К. Некоторые вопросы обоснования мелиоративных режимов орошаемых земель при проектировании оросительных систем.— «Водные ресурсы», 1974, № 2, с. 105—113.

11. Айзенштат Б. А., Кириллова Т. В., Лайхтман Д. Л. Изменение теплового баланса деятельной поверхности при орошении.— «Тр. ГГО», 1953, вып. 39, с. 37—60.

12. Алексеев А. М. Водный режим растения и влияние на него засухи. Казань, Татгосиздат, 1948. 356 с.

13. Алексеев Г. А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л., Гидрометеоиздат, 1971. 363 с.

14. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений. Л., Гидрометеоиздат. 1954. 248 с.

15. Алпатьев С. М., Остапчик В. П. К обоснованию формирования поливных режимов с использованием биоклиматического метода расчета сум-

марного испарения.— «Мелиорация и водное хозяйство», 1971, вып. 19, с. 3—17.

16. Аманов Х. А. Исследование водного и солевого режима почво-грунтов при близком залегании грунтовых вод в Тедженском оазисе.— «Вопросы гидротехники», 1965, вып. 29, с. 129—142.

17. Анисимов В. А., Мансуров М. С. Потери воды на испарение при дождевании.— «Гидротехника и мелиорация», 1969, № 8, с. 37—43.

18. Антонов В. И., Павлов Г. Н. Обоснование технологических схем и расчеты элементов техники полива в проектах орошения земель.— В кн.: «Тезисы докладов Среднеазиатского совещания по совершенствованию технологии и механизации полива с.-х. культур». Ташкент, «Фан», 1974, с. 17—20.

19. Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. Л., Гидрометеоиздат, 1974. 419 с.

20. Аппин А. А. Принципы уменьшения измерения влажности почвы в зоне аэрации.— «Вопросы водного хозяйства», 1974, вып. 29, с. 168—173.

21. Астахова Н. И. Изменчивость весенних влагозапасов почв Украины.— «Тр. УкрНИГМИ», 1973, вып. 124, с. 36—52.

22. Ахмедов Г. А., Каримов С. К. и др. Некоторые результаты изучения испарения и транспирации хлопкового поля, орошаемого дождеванием и бороздковым поливом.— «Вопросы гидротехники», 1966, вып. 25, с. 24—32.

23. Ахмедов Н. А., Коршунова В. С. Водный режим и энергетический баланс посевов хлопчатника.— «Водные ресурсы», 1973, № 4, с. 168—176.

24. Ахмедов Х. А. Основные вопросы орошения и улучшения водопользования. Ташкент, «Узбекистан», 1973. 202 с.

25. Баракаев М. Б., Языков П. П. Полив хлопчатника и других культур по среднесуточному приросту главного стебля. Ташкент, «Фан», 1972. 195 с.

26. Баркан И. Л., Емельянов В. А. Изотопные методы — важный фактор научно-технического прогресса в сельскохозяйственных мелиорациях почв.— В кн.: Материалы Всесоюзного семинара «Радиоизотопные методы и средства в гидротехнике и мелиорации». М., Изд-во ВНИИГиМ, 1974, с. 8—13.

27. Берлянд Т. Г. Изменчивость солнечной радиации, поступающей к поверхности земли.— «Тр. ГГО», 1965, вып. 179, с. 28—40.

28. Беспалов Н. Ф. Сырдарьинская область. В кн.: Режим орошения и гидромодульное районирование по Узбекской ССР. Ташкент, «Узбекистан», 1971, с. 48—102.

29. Беспалов Н. Ф., Рыжов С. Н. Почвенно-мелиоративное и гидромодульное районирование Голодной степи и режим орошения хлопчатника.— В кн.: Тезисы докладов научно-технического совещания по итогам мелиоративных исследований в Голодной степи. Ташкент, «Фан», 1971, с. 60—70.

30. Блинов И. Д. Влияние влажности почвы на рост, развитие и урожай различных сортов хлопчатника.— «Тр. Тадж. НИИСХ», 1963, т. 2, с. 3—23.

31. Бойко С. И. К вопросу о максимально возможном испарении. В кн.: Современные проблемы, мелиорации и пути их решения. М., «Колос», 1973, с. 29—33.

32. Будаговский А. И. Зависимость испарения от метеорологических условий и влажности почвы.— В кн.: Вопросы орошения в низовьях Аму-Дарьи». М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 158—193.

33. Будаговский А. И. Зависимость испарения от влажности почвы.— В кн.: Суховеи, их происхождение и борьба с ними. М., Изд-во АН СССР, 1957, с. 189—198.

34. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. М., «Наука», 1964. 244 с.

35. Будаговский А. И., Савина С. С. Испаряемость с поверхности растительного покрова.— «Метеорология и гидрология», 1956, № 8, с. 20—23.

36. Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Л., Гидрометеоиздат, 1948. 136 с.

37. Будыко М. И. Об определении испарения с поверхности суши.— «Метеорология и гидрология», 1955, № 1, с. 52—58.

38. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л., Гидрометеоиздат, 1956. 255 с.

39. Будыко М. И. О влиянии мелиоративных мероприятий на испаряемость.— «Изв. АН СССР, серия геогр.», 1951, № 1, с. 16—35.

40. Будыко М. И., Юдин М. И., Яковлева Н. И. Испарение с орошаемых участков и испаряемость.— «Метеорология и гидрология», 1954, № 1, с. 7—10.

41. Булавко А. Г. Проникновение атмосферных осадков сквозь покров сельскохозяйственных растений.— «Метеорология и гидрология», 1968, № 12, с. 62—66.

42. Буров Д. И. Испарение воды парующей почвой и почвой под растительным покровом в условиях Заволжья.— «Почвоведение», 1952, № 1, с. 41—52.

43. Бусарова О. Е. Некоторые результаты исследования водного баланса орошаемых почв в межполивные периоды.— В кн.: Формирование ресурсов вод суши. М., «Наука», 1972, с. 117—125.

44. Ваничкина С. И. Суммарное испарение с хлопчатника в условиях Голодной степи.— «Тр. ГГИ», 1968, вып. 151, с. 63—71.

45. Ваничкина С. И., Каримов Э. К. Тепловой баланс и испарение с хлопкового поля.— «Вестн. с.-х. науки», 1973, вып. 11, с. 87—89.

46. Варазашвили Л. И., Петрова М. В. Исследование зависимости статистических параметров основной гидрофизической характеристики почвогрунтов от потенциала влаги и от глубины.— «Почвоведение», 1974, № 4, с. 51—59.

47. Вершинин А. П. К методике расчета испарения с поверхности суши.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 204, с. 84—102.

48. Виноградов Ю. Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана.— «Тр. КазНИГМИ», 1967, вып. 28. 260 с.

49. Владимиров А. Г. Некоторые вопросы режима грунтовых вод в связи с освоением земель Голодной степи.— «Тр. ВСЕГИНГЕО», 1959, сб. 16, с. 128—141.

50. Владимиров А. Г. Мелиоративная гидрогеология. М., Госгеолтехиздат, 1960. 175 с.

51. Власенко А. Е. Закономерности изменений влажности почвы при орошении хлопчатника.— «Сельское хозяйство Узбекистана», 1960, № 3, с. 26—29.

52. Водогрецкий В. Е. Оценка питания грунтовых вод атмосферными осадками и расчеты изменений запасов влаги в почвогрунтах на водосборах в зоне недостаточного увлажнения.— «Тр. ГГИ», 1966, вып. 135, с. 27—51.

53. Вольфцун И. Б. Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 271 с.

54. Воробьев А. М. Растекание растворов минеральных удобрений в почве вокруг пористых труб-увлажнителей.— «Мелиорация и водное хозяйство», 1971, вып. 17, с. 27—34.

55. Гальцов А. П. О климатическом взаимодействии орошаемых и неорошаемых площадей.— «Изв. АН СССР, серия геогр.», 1953, № 3, с. 11—20.

56. Ганиев К. Г. Испарение в средней и верхней частях бассейна Сырдарьи.— Ташкент, «Фан», 1974. 78 с.

57. Гафуров В. К. Расчет водопотребления хлопкового поля по испаряемости в условиях Туркменской ССР.— В кн.: Гидромелиоративные исследования в Туркменистане. Ашхабад, «Ылым», 1972, с. 227—234.

58. Гафуров В. К. Некоторые вопросы установления норм и сроков полива хлопчатника.— В кн.: Вопросы водного хозяйства в Туркменистане. Ашхабад, «Ылым», 1973, с. 122—130.

59. Гельбух Т. М. Схема расчета испарения с орошаемых земель и структура водного баланса орошаемой территории аридной зоны (на примере бассейна реки Сырдарьи).— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 208, с. 135—142.

60. Геткер М. И., Куропатка Л. М., Рубинова Ф. Э. Сток возвратных вод в бассейне р. Сырдарьи и его влияние на минерализацию речной воды в современных условиях и в перспективе.— «Тр. САРНИГМИ», 1975, вып. 25, с. 3—22.

61. Геткер М. И., Сергеев А. И., Побережский Л. Н. Метод расчета испарения с орошаемых почв в холодное полугодие.— «Тр. САРНИГМИ», 1975, вып. 25, с. 23—32.

62. Гильдиев С. А., Набиходжаев С. С. О глубине увлажнения почвы при поливах хлопчатника.— «Хлопководство», 1965, № 6, с. 16—19.

63. Глазова Е. Ф. Экспериментальные исследования испаряемости в условиях Средней Азии.— «Тр. ГГО», 1953, вып. 39, с. 171—178.

64. Голованов А. И., Паласиос О. Об определении зависимости запасов почвенной влаги от глубины грунтовых вод.— «Почвоведение», 1968, № 1, с. 101—105.

65. Горбачев Р. М. Потери воды из каналов-лотков в условиях Голодной степи.— «Тр. Ин-та Средазгипроводхлопок», 1974, вып. 5, с. 114—123.

66. Гуссак В. Б., Рыжов С. Н. Агрофизические свойства почв.— В кн.: Хлопчатник, т. 2. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1957, с. 395—442.

67. Давид Р. Э. Избранные работы по сельскохозяйственной метеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1965. 226 с.

68. Давитая Ф. Ф., Мельник Ю. С. Проблема прогноза испаряемости и оросительных норм. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 71 с.

69. Дерягин Б. В., Мельникова М. К. Экспериментальное исследование передвижения воды в почве под влиянием градиентов концентрации растворенных веществ, температуры и влажности.— «Докл. VI Международного конгресса почвоведов, комиссия 1». М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 119—125.

70. Джалилов А. О некоторых результатах исследования суммарного испарения хлопкового поля методом теплового баланса.— «Докл. АН ТаджССР», 1965, т. 8, № 11, с. 26—30.

71. Димо В. Н. Физические свойства и водный режим орошаемых сероземов Голодной степи.— «Тр. Почвенного ин-та им. Докучаева», 1948, т. 29, с. 201—222.

72. Дмитриев А. В., Коган Р. М. и др. Определение водных запасов в верхнем слое почвы и на ее поверхности методом гамма-съемки.— «Тр. ИЭМ», 1971, вып. 7, с. 183—191.

73. Дмитриенко В. В., Мельник В. Г. Предварительные итоги ресурсных испытаний «Фрегата» на Апшеронском полуострове.— Экспресс-информация, серия 1, вып. 1. М., 1974, с. 9—12.

74. Долгов С. И. Влияние строения почвы на испарение из нее воды.— «Тр. ВИУАА», 1937, вып. 18, с. 75—97.

75. Долгов С. И. Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1948. 208 с.

76. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М., «Статистика», 1973. 391 с.

77. Дренаж сельскохозяйственных земель. Под ред. С. Ф. Аверьянова. Пер. с англ. М., «Колос», 1964. 719 с.

78. Дубинский Г. П., Олейник Р. Н. Некоторые характеристики составляющих теплового баланса и микроклимата орошаемых полей.— В кн.: Биологические основы орошаемого земледелия. М., Изд-во АН СССР, 1966, с. 438—444.

79. Духовный В. А. Орошение и освоение Голодной степи. М., «Колос», 1973. 240 с.

80. Дуюнов И. К., Госсу Л. К., Ивасышина А. С. О режиме засоленности почвогрунтов, грунтовых и дренажных вод под влиянием орошения, дренажа и других факторов.— «Вопросы водного хозяйства», 1974, вып. 29, с. 33—49.

81. Елсуков И. К. Выступление на выездной сессии ВНИИГиМ в совхозе «Пахта-Арал».— В кн.: Орошение в совхозе «Пахта-Арал». М., Сельхозгиз, 1957, с. 113—117.

82. Елсуков И. К. О наименьшей допустимой предполивной влажности почв под хлопчатник.— «Почвоведение», 1962, № 1, с. 84—90.

83. Енилеев Х. Х., Эль Саиди Талат. Физиологические особенности хлопчатника в онтогенезе при избыточном увлажнении почвы.— В кн.: Биологические основы орошаемого земледелия.— М., Изд-во АН СССР, 1966, с. 152—156.

84. Еременко В. Е. Режим орошения и техника полива хлопчатника. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1957. 402 с.

85. Еременко В. Е. Принципы дифференциации режима орошения и техника полива хлопчатника.— В кн.: Биологические основы орошаемого земледелия. М., Изд-во АН СССР, 1957, с. 117—131.

86. Еременко В. Е. О нижней границе влажности почвы перед поливами хлопчатника.— «Хлопководство», 1959, № 12, с. 53—58.

87. Еременко В. Е. Техника полива хлопчатника при комплексной механизации работ в хлопководстве. Ташкент, «Фан», 1960. 78 с.

88. Еременко Г. В., Усманов А. и др. Водный баланс отдельных орошаемых массивов Ферганской области.— «Тр. САНИИРИ», 1972, вып. 133, с. 3—11.

89. Жёлтая Н. Н. К вопросу о различиях запасов почвенной влаги на соседних станциях.— «Тр. ГМЦ», 1968, вып. 24, с. 87—97.

90. Зубенок Л. И. Обоснование метода расчета месячных сумм испарения.— В кн.: Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и обоснования методов расчета испарения с водной поверхности и суши. Валдай, Изд-е ГГИ, 1966, с. 220—231.

91. Иванов А. И. Динамика почвенной влажности при различных нормах полива.— В кн.: Материалы по опытно-мелиоративному делу, 1930, т. 4, с. 258—281.

92. Иванов Н. Н. Об определении величины испаряемости. Изд-е ВГО, 1954, т. 86, № 2, с. 189—195.

93. Иогансон В. Е. Опыт изучения испаряемости в Прикаспии.— В кн.: Микроклиматические и климатические исследования в Прикаспийской низменности. М., Изд-во АН СССР, 1953, с. 65—78.

94. Кабаев В. Е. Ускоренные полевые методы определения влажности и предельной полевой влагоемкости почвы.— «Социалистическое с.-х. Узбекистана», 1957, № 7, с. 70—74.

95. Каган Г. А. О точности определения средней по площади по данным точечных измерений.— «Тр. ГГО», 1965, вып. 175, с. 117—131.

96. Калюжный И. С., Хасанов М. Х., Тетевосян С. А. «Фрегат» на посевах хлопчатника.— «Хлопководство», 1973, № 7, с. 20—21.

97. Канардов В. И. Подпочвенное орошение с помощью пластмассовых труб малого диаметра.— «Гидротехника и мелиорация», 1972, № 6, с. 55—57.

98. Каплинский М. И. Расчетные зависимости для определения влажности, свободной пористости и влагозапасов в зоне аэрации.— «Тр. САНИИРИ», 1971, вып. 126, с. 90—100.

99. Капотова Н. И. Водоотдача водоносных грунтов.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 194, с. 218—241.

100. Карманов В. Г. Использование микротерморезисторной техники для получения информации о среде и жизнедеятельности растений.— «Тр. АФИ», 1969, вып. 24, с. 5—10.

101. Кац Д. М. Баланс и критический режим грунтовых вод Голодной степи.— «Социалистическое с.-х. Узбекистана», 1958, № 4, с. 37—44.

102. Кац Д. М. Лизиметрические исследования в засушливых районах для целей мелиорации.— В кн.: Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с водной поверхности и суши. Валдай, Изд-е ГГИ, 1964, с. 274—284.

103. Кенесарин Н. А. К вопросу установления водного баланса в Голодной степи.— «Социалистическая наука и техника», 1937, № 8, с. 27—35.

104. Кенесарин Н. А. Инфильтрация оросительных вод и их влияние на уровень грунтовых.— «Узбекский геологический журнал», 1958, № 4, с. 5—17.

105. Кенесарин Н. А. Формирование режима грунтовых вод орошаемых районов на примере Голодной степи. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1959. 178 с.

106. Кириллова Т. В. О влиянии орошения на радиационные характеристики деятельной поверхности.— «Тр. ГГО», 1952, вып. 37, с. 7—12.

107. Киселева И. К. Опыт мелиоративного регулирования режима грунтовых вод Голодной степи на примере совхоза «Пахта-Арал».— В кн.: «Вопросы мелиорации Голодной степи». Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1957, с. 7—100.

108. Киселева И. К. Факторы, определяющие мелиоративное состояние орошаемых земель.— «Тр. СоюзНИХИ», 1970, вып. 18, с. 199—232.

109. Киселева И. К. Регулирование водно-солевого режима почв Узбекистана. Ташкент, «Фан», 1973. 151 с.

110. Киселева Т. Л., Конторщиков В. И., Петрова М. В. Опыт прогноза влагозапасов почвы.— «Тр. УкрНИГМИ», 1973, вып. 124, с. 28—35.

111. Ковда В. А. Грунтовые воды Голодной степи.— «Тр. Почвенного ин-та им. Докучаева», 1948, т. 29, с. 43—76.

112. Ковда В. А. Дренаж в борьбе с засолением орошаемых почв.— В кн.: Применение дренажа при освоении засоленных земель. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 5—16.

113. Ковда В. А. Основы учения о почвах, книга 2. М., «Наука», 1973. 467 с.

114. Козлов М. П. Влияние затенения на суммарное испарение с почвы, покрытой луговой растительностью.— «Тр. ГГИ», 1954, вып. 46, с. 137—145.

115. Колпаков В. В. Методика воднобалансовых расчетов по регулированию запасов воды в почве и установлению сроков и норм полива сельскохозяйственных культур.— «Докл. ТСХА», 1962, вып. 74, с. 27—36.

116. Константинов А. Р. Испаряемость — комплексная характеристика метеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур.— В кн.: Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения испарения с поверхности суши. Валдай, Изд-е ГГИ, 1961, с. 116—126.

117. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л., Гидрометеоиздат, 1968. 532 с.

118. Константинов А. Р., Конторщиков В. И. Статистическая структура поля влажности почвы юго-восточных районов Украины в слоях 0—20 и 0—100 см.— «Тр. УкрНИГМИ», 1970, вып. 94, с. 103—112.

119. Константинов А. Р., Филиппенко Л. А. Некоторые вопросы методики расчета норм и сроков полива по метеорологическим данным.— «Тр. УкрНИГМИ», 1967, вып. 71, с. 12—28.

120. Константинов А. Р., Харченко С. И. Оценка испаряемости в районе Сальских степей.— «Тр. ГГИ», 1956, вып. 57, с. 73—85.

121. Константинов В. К. К определению запасов влаги в почве по глубине стояния почвенно-грунтовых вод.— «Почвоведение», 1966, № 2, с. 58—66.

122. Конторщиков В. И. Статистическая структура поля влажности почвы на малых площадях.— «Тр. УкрНИГМИ», 1970, вып. 91, с. 85—88.

123. Конторщиков В. И. К оценке репрезентативности наблюдений над влажностью почвы.— «Тр. УкрНИГМИ», 1970, вып. 91, с. 78—85.

124. Костяков А. Н. Основы мелиораций. М., Сельхозгиз, 1951. 750 с.

125. Костяков А. Н., Фаворин Н. Н., Аверьянов С. Ф. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., Изд-во АН СССР, 1956. 451 с.

126. Котышева М. М., Сабинина И. Г. Агрогидрологические особенности почвы основных хлопкосеющих районов Узбекистана.— В кн.: Сб. работ ТГО, 1961, вып. 1, с. 102—120.

127. Краснянская В. П. Связь температуры воздуха с температурой почвы на глубине 5 и 10 см и ее практическое применение.— «Тр. ДВНИГМИ», 1961, вып. 12, с. 106—110.

128. Крылов М. М. Изучение водного баланса в условиях Бухарского оазиса.— В кн.: Материалы к I съезду ученых Узбекистана, секция геологии и гидрологии. Ташкент, Изд-е Комитета наук УзССР, 1937, с. 108—110.

129. Крылов М. М. Задачи гидрогеологических исследований в связи с освоением Голодной степи.— В кн.: Материалы к освоению Голодной степи. Ташкент, Госиздат УзССР, 1959, с. 15—21.

130. Кузин П. С. Об испарении с поверхности почвы.— «Тр. ГГИ», 1938, вып. 7, с. 68—99.

131. Кузин П. С. Испарение с поверхности суши на территории СССР.— «Тр. ГГИ», 1950, вып. 26, с. 118—127.

132. Лактаев Н. Т. Теоретическое обоснование технологии полива сельскохозяйственных культур по бороздам.— «Тр. САНИИРИ», 1971, вып. 127, с. 3—41.

133. Лапшова Л. П. Испарение и тепловой баланс хлопкового поля Вахшской долины Таджикистана.— «Тр. ГГО», 1967, вып. 214, с. 78—86.

134. Ласточкин Д. С. О механизации полива сельскохозяйственных культур.— «Гидротехника и мелиорация», 1969, № 10, с. 41—47.

135. Лебедев А. В. Прогноз изменения уровня грунтовых вод на орошаемых территориях. М., Госгеолтехиздат, 1957. 175 с.

136. Лебедев А. В. Определение параметра μ по данным стационарных наблюдений за влажностью грунтов зоны аэрации.— В кн.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии, № 15. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 50—61.

137. Левенко А. А. К вопросу о расчете испарения, испаряемости и влагозапасов почвы по метеоданным.— «Тр. УкрНИГМИ», 1971, вып. 105, с. 34—40.

138. Легостаев В. М. Гидромодульное районирование хлопкового пояса Средней Азии и Южного Казахстана. Ташкент, Изд-е Комитета наук УзССР, 1935. 111 с.

139. Легостаев В. М. Мелиоративное значение риса.— В кн.: Мелиорация почв в СССР. М., «Наука», 1971, с. 115—137.

140. Легостаев В. М., Калюжный И. С. и др. Результаты испытаний дождевальной машины ДОС-400 в Голодной степи.— «Гидротехника и мелиорация», 1971, № 3, с. 50—58.

141. Легостаев В. М., Киселева И. К., Суннатов И. К. К вопросу о регулировании водно-солевого режима почв Каршинской степи.— «Тр. СоюзНИХИ», 1971, вып. 21, с. 90—98.

142. Легостаев В. М., Коньков Б. С. Причины подъема грунтовых вод и меры борьбы с засолением и заболачиванием почв. Ташкент, Узгосиздат, 1944. 37 с.

143. Легостаев В. М., Коньков Б. С. Мелиоративное районирование. Ташкент, Узгосиздат, 1951. 190 с.

144. Лейбфрейд М. С. К вопросу о прогнозировании суммарного испарения в зоне выклинивания и неглубокого залегания грунтовых вод Чуйской впадины.— «Вопросы водного хозяйства», 1974, вып. 29, с. 152—158.

145. Леонов В. А. О пространственном распределении влагозапасов на орошаемых полях при поливах дождеванием.— «Метеорология и гидрология», 1969, № 5, с. 73—80.

146. Леонов Е. А. Дренажно-коллекторный сток на орошаемых землях.— «Тр. ГГИ», 1969, вып. 158, с. 72—82.

147. Леонов Е. А., Леонова Н. Е. Результаты изучения водного режима почв малых водосборов в бассейне р. Дона.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 194, с. 133—154.

148. Липкинд И. М. Влияние азота, фосфора и калия на использование воды хлопчатником на основных разностях орошаемых почв Таджикистана.— В кн.: Водный режим растений в засушливых районах СССР. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 144—150.

149. Лось М., Цымбар А. Сравнительные испытания новых дождевальных машин.— «Гидротехника и мелиорация», 1969, № 10, с. 53—63.

150. Мавлянов Г. А., Ганиев К. Г. Методика составления водного баланса. Ташкент, «Фан», 1973. 116 с.

151. Максимов Н. А. Развитие учения о водном режиме и засухоустойчивости растений от Тимирязева до наших дней. «Тимирязевские чтения», 1944, т. 4. 47 с.

152. Меднис М. П. Режим орошения и густота стояния хлопчатника. Ташкент, «Фан», 1973. 250 с.

153. Мезенцев В. С. Графики для определения влажности почвы и элементов водного баланса за внутригодовые промежутки времени по климатическим данным.— «Изв. АН СССР, серия геогр.», 1970, № 3, с. 113—118.

154. Мезенцев В. С., Карнацевич И. В. и др. Режимы влагообеспеченности в условиях гидромелиораций степного края. М., «Колос», 1974. 240 с.

155. Мельник Ю. С., Николаева А. С., Корганов А. С. Суммарное испарение с перелогов, примыкающих к Южному Голодностепскому каналу.— «Метеорология и гидрология», 1968, № 6, с. 68—74.

156. Милькис Б. Е., Ахмедов Г. А. Величина суммарного испарения с хлопкового поля на землях нового освоения Центральной Ферганы.— «Тр. САНИИРИ», 1967, вып. 33, с. 75—82.

157. Милькис Б. Е., Ахмедов Г. А., Туйчиев Т. К вопросу о зависимости суммарного испарения с орошаемого хлопкового поля от суммарной радиации и радиационного баланса.— «Тр. САНИИРИ», 1969, вып. 118, с. 95—116.

158. Мильких Б. Е., Муминов Ф. А. Вопросы методики расчета испарения с орошаемых полей.— «Тр. САНИГМИ», 1971, вып. 66, с. 52—61.

159. Минаева Е. Н. О тепловом балансе орошаемых полей и естественной растительности в засушливых условиях.— В кн.: Тепловой и радиационный баланс естественной растительности и сельскохозяйственных полей. М., «Наука», 1965, с. 127—135.

160. Молчанов Л. А. Новая карта испаряемости на территории Средней Азии.— В кн.: Метеорология и гидрология в Узбекистане. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1955, с. 35—39.

161. Морозов А. Н., Павлов Г. Н. О расчете горизонтального дренажа засоленных земель.— «Тр. Ин-та Средазгипроводхлопок», 1971, вып. 1, с. 14—33.

162. Мосиенко Н. А. Агрогидрологические основы орошения в степной зоне. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 213 с.

163. Муминов Ф. А. Испарение с хлопкового поля и его связь с метеорологическими элементами.— «Тр. САНИГМИ», 1964, вып. 14, с. 38—46.

164. Муминов Ф. А. Тепловой баланс и формирование урожая хлопчатника. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 247 с.

165. Муминов Ф. А., Абдуллаев А. К. К вопросу использования степени затенения почвы под хлопчатником для характеристики его состояния и продуктивности.— «Тр. САНИГМИ», 1966, вып. 26, с. 32—39.

166. Мушкин И. Г., Гафуров В. К. Тепловой и водный баланс хлопкового поля. Л., Гидрометеоиздат, 1973. 118 с.

167. Неварко Е. Н. О влиянии влажности поверхности почвы и влагообеспеченности листьев растений на их радиационную температуру.— «Вопросы водного хозяйства», 1973, вып. 31, с. 60—67.

168. Немиро Э. В. К вопросу о подвижности почвенной влаги.— «Мелиорация и водное хозяйство», 1970, вып. 13, с. 3—8.

169. Осипов Э. Р., Побережский Л. Н. Режим коллекторно-дренажного стока в Каршинской степи.— «Тр. ТИИМСХ», 1973, вып. 59, с. 121—130.

170. Павлов Г. Н. О поливном режиме сельскохозяйственных культур в новой зоне орошения Голодной степи.— «Тр. ТИИМСХ», 1970, вып. 32, с. 48—56.

171. Павловский М. А. Влияние углубления вспашки на запас почвенной влаги.— «Почвоведение», № 8, 1953, с. 61—74.

172. Пенман Х. Л. Растения и влага. Пер. с англ. Л., Гидрометеоиздат, 1968. 162 с.

173. Петров Е. Г., Преображенская М. В. Водно-солевой режим почв при орошении хлопчатника дождеванием на фоне осенне-зимней влагозарядки в совхозе «Пахта-Арал».— В кн.: Орошение хлопчатника дождеванием. Изд-е ВНИИГиМ, 1960, с. 98—116.

174. Петрова М. В. Долгосрочное прогнозирование влагозапасов в почве динамико-статистическим методом.— В кн.: Мелиоративная наука — производству. Л., Изд-е Минводхоза РСФСР, 1971, с. 184—195.

175. Петинов Н. С. Современное состояние и пути дальнейшего развития научно-исследовательских работ по орошению и теории водного режима

сельскохозяйственных растений.— В кн.: Биологические основы орошаемого земледелия. М., Изд-во АН СССР, 1957, с. 16—71.

176. Планин Ю. Г. К методике определения критических глубин залегания грунтовых вод на основе экспериментальных исследований элементов водно-солевого баланса в Вахшской долине.— «Тр. ВСЕГИНГЕО», 1971, вып. 37, с. 24—33.

177. Побережский Л. Н. К вопросу о территориальной изменчивости почвенной влажности.— «Тр. ТГМО», 1971, вып. 4, с. 130—136.

178. Побережский Л. Н. Способ оценки испаряемости в условиях орошения.— «Тр. САНИГМИ», 1972, вып. 62, с. 54—56.

179. Побережский Л. Н. Оценка дренажного эффекта перелога в Центральном массиве Голодной степи.— «Тр. Ин-та Средазгипроводхлопок», 1973, вып. 4, с. 139—148.

180. Побережский Л. Н. Закономерности пространственной изменчивости влажности орошаемой почвы под хлопчатником.— «Почвоведение», 1973, № 3, с. 50—59.

181. Побережский Л. Н. Метод расчета суммарного испарения в период вегетации хлопчатника.— «Тр. САРНИГМИ», 1975, вып. 23, с. 121—130.

182. Побережский Л. Н. О пространственной изменчивости глубин уровня грунтовых вод на малых орошаемых площадях.— «Тр. САРНИГМИ», 1975, вып. 23, с. 152—161.

183. Побережский Л. Н. К вопросу о зависимости суммарного испарения от глубины залегания грунтовых вод.— «Тр. САРНИГМИ», 1975, вып. 25, с. 33—42.

184. Побережский Л. Н., Геткер М. И. Почвенно-гидрологическая характеристика развития хлопчатника на землях совхоза № 7 в 1966 г.— «Научные тр. ТашГУ», 1967, вып. 330, с. 242—254.

185. Побережский Л. Н., Геткер М. И. Зависимость испарения с поверхности орошаемой почвы под хлопчатником от ее влажности и затененности.— «Изв. АН УзССР, серия технических наук», 1969, № 2, с. 83—85.

186. Побережский Л. Н., Решетов Г. Г. Водно-физические свойства Каршинской степи (первая очередь освоения).— «Тр. Ин-та Средазгипроводхлопок», 1972, вып. 3, с. 108—136.

187. Побережский Л. Н., Трофимов Г. Н. Перехват атмосферных осадков растительностью и его учет при водобалансовых исследованиях.— «Тр. САНИГМИ», 1972 вып. 62, с. 46—53.

188. Попов В. П. Баланс влаги в почве и показатели степени сухости климата УССР.— «Наукові записи КДУ», 1948, т. 7, вып. 1, с. 5—82.

189. Постановление Всесоюзной научно-технической конференции по вопросам борьбы с засолением орошаемых земель 28—31 января 1964 г. в г. Ташкенте. М., 1964. 16 с.

190. Преображенская М. В. Водно-солевой баланс почв при дождевании хлопчатника и близком залегании грунтовых вод.— «Вестник с.-х. науки», 1964, № 6, с. 92—101.

191. Пронин А. Ф. Верхняя и нижняя границы влажности основных типов почв, обеспечивающих их качественную обработку.— «Докл. ТСХА», 1965, вып. 108, с. 157—160.

192. Пушкарев В. Ф. Исследование методов наблюдений над испарением с почвы.— «Тр. ГГИ», 1954, вып. 45, с. 5—65.

193. Пушкарева З. П., Савельева Р. В., Мусаханов А. Х. Некоторые мелиоративные рекомендации по оздоровлению засоленных земель Чимбайского района Каракалпакской АССР.— «Тр. САНИИРИ», вып. 133, 1972, с. 53—59.

194. Рабочев И. С. Мелиорация засоленных земель.— «Тр. VI сессии АН ТССР». Ашхабад, 1954, с. 5—14.

195. Разумова Л. А. Пространственная изменчивость и способы учета влажности почвы на орошаемых полях.— «Тр. ЦИП», 1965, вып. 145, с. 3—29.

196. Расчетные значения оросительных норм сельскохозяйственных культур в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи.— Ташкент, Изд-е Ин-та «Средазгипроводхлопок», 1970. 292 с.

197. Рачинский А. А. Потери воды в хозяйственной оросительной системе и меры борьбы с ними. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1956. 151 с.

198. Рачинский А. А. Возможность использования грунтовых вод для промывок и вегетационных поливов.— «Вопросы гидротехники», 1965, вып. 29, с. 18—20.

199. Рекс Л. М. Перераспределение солей в почвогрунтовом слое.— «Прикладная механика и теоретическая физика», 1967, № 6, с. 35—38.

200. Решетов Г. Г. Оценка хлоридно-сульфатно-натриевого засоления почвогрунтов по сокращенным анализам.— «Почвоведение», 1973, № 6, с. 67—69.

201. Рогоцкий В. В. Применение метода множественной линейной корреляции для исследования и расчета суммарного испарения.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 207, с. 53—78.

202. Рогоцкий В. В. Результаты наблюдений на агроводнобалансовом полигоне ВНИГЛ.— «Тр. ГГИ», 1969, вып. 165, с. 72—86.

203. Роде А. А. Методы изучения водного режима почв. М., Изд-во АН СССР, 1960. 243 с.

204. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге, т. 1. Л., Гидрометеоиздат, 1965. 664 с.

205. Рожанская О. Д. Испарение и тепловой баланс деятельной поверхности орошаемых полей.— «Сб. трудов по агроном. физике», 1954, вып. 7, с. 71—83.

206. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Л., Гидрометеоиздат, 1974. 423 с.

207. Розанов А. Н. Почвы Голодной степи.— «Тр. Почвенного ин-та им. Докучаева», 1948, т. 29, с. 77—160.

208. Рубинова Ф. Э., Геткер М. И. К вопросу оценки стока, формирующегося ниже опорных гидропостов в бассейне р. Сырдарьи.— «Тр. САРНИГМИ», 1974, вып. 23, с. 59—70.

209. Рыжов С. Н. Орошение хлопчатника в Ферганской долине. Ташкент, Изд-во АН УзССР», 1948. 243 с.

210. Рыжов С. Н. Физиологические и почвенные показатели потребности в орошении сельскохозяйственных культур.— «Почвоведение», 1965, № 11, с. 42—45.

211. Рыжов С. Н. Потребность различных культур в орошении.— В кн.: Почвы аридной зоны как объект орошения. М., «Наука», 1968, с. 176—209.

212. Рыжов С. Н., Еременко В. Е. Поливы хлопчатника.— «Тр. САГУ, новая серия, биол. науки», 1953, вып. 42, кн. 15. 42 с.

213. Сабинина И. Г. Продолжительность периода от посева до всходов хлопчатника в зависимости от температурного режима и влажности почвы.— «Сельское хозяйство Узбекистана», 1961, № 3, с. 30—34.

214. Савина С. С. Использование зависимости урожая от дефицита испарения в оценке эффекта мелиорации.— «Изв. АН СССР, серия геогр.», 1960, № 1, с. 75—80.

215. Салтыков И. И. Температура поверхности почвы как показатель ее влажности.— «Орошаемое земледелие», 1966, вып. 1, с. 145—149.

216. Саттаров Ф. Н., Меднис М. П. Поливные режимы хлопчатника при дождевании для земель с близким и глубоким залеганием грунтовых вод Узбекистана.— «Тр. СоюзНИХИ», 1974, вып. 27, с. 92—101.

217. Селянинов Г. Т. К методике сельскохозяйственной климатографии.— «Тр. по с.-х. метеорологии», 1930, вып. 22, № 2, с. 45—89.

218. Серебренников Ф. В. Работа дренажных устройств на засоленных землях целинной зоны Голодной степи на примере совхоза № 1.— В кн.: Тезисы докл. на научно-техн. совещании по итогам мелиоративных исследований в Голодной степи. Ташкент, «Фан», 1971, с. 96—97.

219. Серебренников Ф. В. Некоторые вопросы обоснования дренажа орошаемых земель.— «Тр. ТИИМСХ», 1973, вып. 37, с. 185—194.

220. Серебренников Ф. В., Лешанский А. И. Солевой режим грунтовых вод в условиях орошения.— «Тезисы XXXIII научно-производственной конференции профессорско-преподавательского состава ТИИМСХ. Секция мелиорации и гидротехнических сооружений, механизации гидромелиоративных работ». Ташкент, Изд-е ТИИМСХ, 1974, с. 62—63.

221. Серякова Л. П. Испаряемость на территории Советского Союза.— «Тр. ЛГМИ», 1958, вып. 8, с. 141—159.

222. Серякова Л. П. Изменчивость испаряемости на юге ЕТС и в Средней Азии в отдельные годы.— «Тр. ЛГМИ», 1960, вып. 9, с. 149—161.

223. Сиротенко О. Д. Некоторые результаты исследования закономерности пространственной изменчивости агрометеорологических показателей.— «Тр. ИЭМ», 1970, вып. 13, с. 20—29.

224. Скворцов А. А. Об испарении и балансе в приземном слое атмосферы.— «Тр. Ин-та энергетики АН УзССР», 1947, вып. 1, с. 3—114.

225. Слейтер Р., Макилрой М. Практическая микроклиматология. Преимущественно о роли воды в системе почва—растение—атмосфера. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1964. 308 с.

226. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский Л. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М., «Наука», 1965. 511 с.

227. Смирнова Н. В. Климатический очерк района работы экспедиции в совхозе «Пахта-Арал».— «Тр. ГГО», 1953, вып. 39, с. 5—27.

228. Смирнова С. И., Мамаев Е. В. Изменчивость влажности почвы при характеристике ее различными единицами и некоторые источники ошибок первичных измерений.— «Тр. ИЭМ», 1970, вып. 13, с. 47—57.

229. Старов П. В., Ахмедов Р. А. Диагностирование сроков полива в период цветения—плодообразования по внешним признакам состояния хлопчатника.— «Социалистическое с. х. Узбекистана», 1937, № 1, с. 26—36.

230. Технические указания по проектированию горизонтального дренажа засоленных земель. М., Изд-е Гипроводхоза, 1962. 176 с.

231. Тимирязев К. А. Избранные сочинения, т. 1. М., Сельхозгиз, 1957. 723 с.

232. Торн Д., Петерсон Х. Орошаемые земли. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1952, 380 с.

233. Туляганов Х. Т. Гидрогеологические основы освоения земель предгорных равнин. Ташкент, «Фан», 1971. 134 с.

234. Турапов И., Саноян М. Г. Уточнение методики оценки запасов продуктивной почвенной влаги.— В кн.: Изучение почв и использование их в сельском хозяйстве. Ташкент, «Фан», 1970, с. 331—339.

235. Тюрк Л. Баланс почвенной влаги. Пер. с франц. Л., Гидрометеоиздат, 1968. 228 с.

236. Указания по расчету недостатка водопотребления сельскохозяйственных растений. Л., Изд-е ГГИ, 1974. 96 с.

237. Урсулов А. Н. Испаряющая способность различных структурных фракций почвы.— «Тр. Конференции по почвоведению и физиологии культурных растений», 1937, т. 1, с. 257—268.

238. Федоров Б. В. Принципы построения дифференцированного режима орошения сельскохозяйственных культур.— В кн.: Биологические основы орошаемого земледелия. М., Изд-во АН СССР, 1957, с. 132—140.

239. Филиппов Л. Н. Способ определения сроков полива хлопчатника по влажности почвы.— «Хлопководство», 1955, № 1, с. 44—48.

240. Филиппова А. К. Результаты съемок влажности почвы на водосборах.— «Тр. ГГИ», 1964, вып. 92, с. 104—118.

241. Харченко К. И. Суммарное испарение с различных угодий при оптимальном увлажнении почвы.— «Тр. ГГИ», вып. 82, 1962, с. 102—114.

242. Харченко К. И. Регулирование испарения путем внесения минеральных удобрений.— В кн.: Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с водной поверхности и почвы. Валдай, Изд-е ГГИ, 1964, с. 419—421.

243. Харченко С. И. Тепловоднобалансовый метод обоснования норм орошения и поливных режимов.— «Тр. ГГИ», 1965, вып. 125, с. 3—33.

244. Харченко С. И. Гидрометеорологический метод определения поливного режима и расчета сроков полива.— «Тр. ГГИ», 1967, вып. 146, с. 53—73.

245. Харченко С. И. Использование материалов наблюдений сети комплексных воднобалансовых и агрометеорологических станций в расчетах водного баланса речных бассейнов.— В кн.: Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов. Валдай, Изд-е ГГИ, 1967, с. 65—79.

246. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. 2-е изд. Л., Гидрометеоиздат, 1975. 342 с.

247. Ходжибаев Н. Н., Алимов М. С. Региональный водно-солевой баланс Голодной степи. Ташкент, «Фан», 1966. 88 с.

248. Циприс Д. Б. Воздействие дождевания на микроклимат орошаемого поля в увлажненной зоне.— «Тр. САНИГМИ», 1971, вып. 66, с. 76—90.

249. Чаповская Е. В. Суммарное испарение с орошаемых земель Гиссарской долины Таджикской ССР.— «Тр. ГГИ», 1968, вып. 151, с. 96—105.

250. Чаповская Е. В., Планин Ю. Г. Суммарное испарение с орошаемых земель Вахшской долины Таджикской ССР.— «Тр. ГГИ», 1968, вып. 151, с. 106—124.

251. Чичасов В. Я. Орошение дождеванием.— В кн.: Орошение и обводнение земель в СССР. М., «Колос», 1964, с. 176—195.

252. Чудновский А. Ф. Энергетический метод изучения вопросов орошения сельскохозяйственных культур.— В кн.: Суховеи, их происхождение и борьба с ними. М., Изд-во АН СССР, 1957, с. 149—167.

253. Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций. Л., Гидрометеоиздат, 1973. 165 с.

254. Шардаков В. С. Водный режим хлопчатника и определение оптимальных сроков полива. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1953. 96 с.

255. Шаумян В. А. Основы эксплуатации оросительных и осушительных систем. М., Сельхозгиз, 1956. 462 с.

256. Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР по обеспеченности растений теплом и влагой. М., «Колос», 1967. 335 с.

257. Шейнкин Г. Ю., Гордеев В. Б. и др. Опыт внутрипочвенного орошения.— «Хлопководство», 1973, № 7, с. 33—36; № 8, с. 26—29.

258. Шестаков В. М. Методические указания по расчетам систематического дренажа в слоистых системах. М., Изд-е ВСЕГИНГЕО, 1966. 65 с.

259. Шпак И. С. Результаты исследований фильтрационной способности водосборов.— «Тр. ГГИ», 1955, вып. 51, с. 68—87.

260. Шпак И. С., Штангей И. Ф., Штангей А. И. О методике определения задержания воды сельскохозяйственными растениями при дождевании.— «Почвоведение», 1974, № 1, с. 84—89.

261. Шредер В. Р. О поливной норме.— «Хлопководство», 1963, № 2, с. 42—44.

262. Шредер В. Р., Сафонов В. Ф., Паренчик Р. И. Районирование режимов орошения.— «Гидротехника и мелиорация», 1966, № 8, с. 1—9.

263. Шувалов А. Н. Результаты определения суммарного испарения методами лизиметров, водного и теплового баланса, весовых испарителей в Сыртовом Заволжье.— В кн.: Материалы 2-й зональной научно-производственной конференции. Секция проектирования, строительства и эксплуатации оросительных систем в районах Поволжья. Волгоград, 1973, с. 138—139.

264. Шульц В. Л. Опыт составления водного баланса левого берега Бухарского оазиса.— «Социалистическая наука и техника», 1935, № 11, с. 30—40.

265. Юлдашев Г. Водно-солевой баланс почвогрунтов колхоза им. Ленина Джетысайского района.— «Тр. САНИИРИ», 1972, вып. 133, с. 110—115.

266. Burnet E., Fisher C. E. Correlation of soil moisture and cotton yields.— "Soil Sci. Amer. Proc.", 1954, vol. 18, N 2, p. 18—23.

267. Corsini P. C. Agregacao e fluxo da agna do solo. (Efeito da radiacao e vento.) "Cienc. e cult.", 1973, N 2, vol. 25, p. 156—163.

268. Ehler W. Z. Cotton leaf temperatures as related to soil water deplation and meteorological factors.— "Agron. J.", 1973, vol. 65, N 3, p. 404—409.

269. Hendrickson A. H., Veirmeyer F. J. Some factors, affecting the rate of growth of pears.— In: Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 1941, vol. 39, p. 118—124.

270. Hiler E. A., Howel T. A., Lews R. B., Boos R. P. Irrigation timing by the stress day index method.— "Trans. ASAE". 1974, vol. 17, N 3, p. 393—398.

271. Hylcama T. E. A. Effect of soil salinity on the loss of water from vegetated and fallow soil.— In: Water in Unsaturated Zone. Proc. Wageningen Sympos., vol. 2, Paris, 1969, p. 42—49.

272. Kramer P. J. Plant and soil water relationship. N. Y. McGraw-Hill Book Co, 1949, 347 p.

273. Martin B., Johnson Z. Research on Sleepers River at Danvillec Vermont.— "J. Irrig. Drain. Div.", vol. 96, N 1, 1970, p. 18—24.

274. McDermott J. J. The effect of the moisture content of the soil upon the rate of exudation.— "Amer. J. Bot.", vol. 32, 1945, p. 86—95.

275. Milligan T. N. Class "A" pan and irrigation scheduling.— "Irrigat. Age.", 1973, vol. 7, N 10, p. 12—15.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Список основных обозначений и сокращений, принятых в тексте . . . 6

Глава 1. **Воднобалансовые исследования на орошаемых землях** 7

Глава 2. **Влагообмен грунтовых вод с зоной аэрации** 12
1. Изменение глубины залегания грунтовых вод под влиянием поливов . . . . . —
2. Питание грунтовых вод атмосферными осадками 19
3. Расход грунтовых вод в зону аэрации 24
4. Пространственная изменчивость глубины залегания уровня грунтовых вод 30

Глава 3. **Динамика влажности почвы в зоне аэрации** 41
1. Изменение влажности почвы под влиянием поливов . . . . —
2. Влажность почвы в межполивные интервалы 45
3. Зависимость влажности почвы от глубины залегания грунтовых вод 49
4. Пространственная изменчивость влажности орошаемой почвы под хлопчатником 55

Глава 4. **Режим суммарного испарения** 67
1. Испаряемость . . . . . —
2. Суммарное испарение в период вегетации хлопчатника . . 74
3. Испарение в невегетационный период 87
4. Зависимость испарения от определяющих его факторов . . 90

Глава 5. **Проектирование режима орошения хлопчатника и дренажа с использованием результатов воднобалансовых исследований** 103
1. Режим орошения хлопчатника . . . . . —
2. Нагрузка на дренажную систему 132

Заключение 140

Список литературы 143