Г-1

К.Г. Ганиев

Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ УЗБЕКСКОЙ ССР
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«УЗБЕКГИДРОГЕОЛОГИЯ»
ИНСТИТУТ ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

К. Г. ГАНИЕВ

ТС-272
556.13

ИСПАРЕНИЕ И ИНФИЛЬТРАЦИОННОЕ ПИТАНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

(НА ПРИМЕРЕ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ)

Уважаемому
Виктору Абрамовичу
на добрую память
автор
4/III-80 г.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УЗБЕКСКОЙ ССР
ТАШКЕНТ — 1979

УДК 556.135:556.14[(575) + (574.5) + (479.24)]

К. Г. Ганиев. **Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод (на примере орошаемых земель).** Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1979. Табл.— 63, рис.— 43, библ.— 220 назв.

Монография посвящена изучению питания и расходования грунтовых вод на орошаемых землях аридной зоны Советского Союза, их зависимости от естественной увлажненности, механического состава грунтов, деятельного покрова, глубины залегания грунтовых вод. Рассмотрено влияние изменения водно-физических свойств почв во времени, площади лизиметров, минерализации подземных вод, размеров фона экспериментальной площадки, принятого режима уровня грунтовых и конструктивных недостатков лизиметров (условия экспериментов) на оптимальность процессов в физических моделях. Предложены коэффициенты для расчета площадных характеристик питания и расходования грунтовых вод по точечным данным и принципы районирования, основанные на интенсивности испарения. Рассматриваются вопросы оценки аридности условий, даны методические и некоторые теоретические основы организации и проведения воднобалансовых исследований, анализ методических, определительских, конструктивных недостатков ныне широко применяемого лизиметрического метода.

Книга рассчитана на гидрометеорологов, гидрогеологов, мелиораторов, а также студентов вузов.

Ответственный редактор
докт. геол.-мин. наук Н. Н. Ходжибаев

Г $\frac{20866-857}{М\ 355(06)-79}$ 73—79 © Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1979

ВВЕДЕНИЕ

XXV съезд Коммунистической партии Советского Союза поставил перед учеными задачи по решению народнохозяйственных проблем в связи с освоением новых земельных массивов и мелиорацией староорошаемых территорий. Существующие методы научно-исследовательских работ не соответствуют запросам практики, что стало наиболее ощутимым в связи с внедрением машинных методов обработки информации, моделирования на основе электронно-вычислительных и аналоговых машин для прогноза состояния земель. Точность параметров водоносного горизонта, водно-солевого баланса зоны аэрации, сезонного и многолетнего режима подземных вод неудовлетворительная, поэтому насущным стал вопрос повышения надежности первичной информации на основе улучшения качества экспериментов в лабораторных и полевых условиях. Возросшие потребности проектирующих учреждений в информации требуют разработки новых методов исследования. В связи с этим в ближайшие годы предстоит усовершенствовать существующие способы определения параметров, создать научно обоснованные направления экспериментов, призванные увеличить точность измерений на порядок выше наряду с широким внедрением средств автоматизации, приборов, аппаратуры новейших конструкций на основе научно-технического прогресса.

Существующие методики экспериментальных работ необходимо пересмотреть, разработать новые и в кратчайшие сроки внедрить их в практику.

В настоящее время теория испарения грунтовых вод не разработана, поэтому приходится сталкиваться с такими способами расчета, точность которых во многих случаях превышает абсолютную величину искомого параметра.

При исследовании питания и расходования грунтовых вод в орошаемых районах выяснилось, что слабо изучена зависимость от механического состава, слоистости, структуры, капиллярных и других водно-физических свойств грунтов, деятельного покрова и нормы полива, промывок, минерализации и химического состава

грунтовых вод, конструктивных особенностей приборов и принятого режима грунтовых вод в моделях. Не рассматривались вопросы перехода от точечных данных в лизиметрических установках на орошаемую площадь, а также оптимальные размеры фона лизиметрической площадки.

Следовательно, в настоящее время теория отстает от требований практики и невозможно выработать достаточно надежной методики изучения испарения и питания грунтовых вод, рассчитать их величины с учетом сложного комплекса факторов.

Необходимы анализ результатов многолетних исследований, установление зависимостей испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод, на их основе составление программы для выработки теории изучаемого процесса и методических рекомендаций при производственных работах и в практике расчетов основных составляющих водного баланса грунтовых вод. За более чем вековой период экспериментальных исследований установлена зависимость испарения от размеров водоемов, глубины залегания грунтовых вод, деятельного покрова, механического состава, структуры и капиллярных свойств грунтов, выработаны редукционные коэффициенты, предложены эмпирические зависимости, среди которых широко распространены формулы С. Ф. Аверьянова, М. М. Крылова, В. Г. Ткачука, В. М. Шестакова, Н. Н. Биндемана и др. Несмотря на богатый собранный материал, существующие научные положения, разработанные для изучения процессов испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в частности, и суммарного испарения с дневной поверхности вообще, недостаточно освещают теоретические основы затрагиваемого вопроса ввиду сложности и многофакторной зависимости.

Достижения научно-технического прогресса, запросы практики требуют пересмотра методик расчета отдельных составляющих водного баланса. Сфера применения редукционных коэффициентов для определения испарения с водоемов, озер, по данным испарителей с водной поверхности, значительно сужена, доказана их изменчивость по сезонам года. Применимость эмпирических зависимостей для расчета испарения и питания грунтовых вод ограничена гидрогеологическими условиями, уровенным режимом грунтовых вод, дренированностью территорий и т. д.

Основной полевой метод определения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в условиях орошения — лизиметрический. Однако он имеет ряд определительских, конструктивных и других недостатков, для устранения которых необходимо объединить усилия мелиораторов, гидрогеологов, биологов, почвоведов, что достигается в процессе многолетних целенаправленных научных исследований по модернизации лизиметров и улучшению их конструкций, унификации метода наблюдений и побочных измерений с комплексацией и взаимоувязкой программы исследований. Необходимо также привлечь научные, проектные и производственные организации.

Один из главных недостатков экспериментальных работ по определению основных составляющих водно-солевого баланса — отсутствие надежного прибора-эталона, высокочувствительного, отвечающего условиям динамичности ирригационно-хозяйственного фактора с относительно высокими пределами изменения. Эталонный прибор, или установка должны обеспечивать точность срочного замера $\pm 0{,}1$ *мм*, что на два порядка выше существующей.

Высокая точность измерения позволит выяснить теневые моменты в закономерностях передвижения влаги и солей в зоне аэрации, в особенностях формирования испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод, связанных как с климатическими факторами, так и со строением почв и грунтов, развитием корневой системы однолетних и многолетних растений, минерализацией грунтовой воды, рядом агротехнических мероприятий на полях орошения и др.

В настоящее время достаточно надежный, независимый, метод определения точности экспериментальных работ отсутствует. Имеющиеся данные зависят от продолжительности ряда, субъективных причин, относящихся к обработке исходного материала и т. д.

Низкий уровень экспериментальных работ, также объясняется отсутствием научно обоснованной теоретической базы, что связано с ограниченностью масштаба опытов и недостаточной повторяемостью. В сферу широкого использования и научных обобщений вовлекался некачественный материал. Ключевые участки размещались без учета климатической увлажненности, влияния слоистости грунтов и особенностей распределения капиллярных сил в различных почвах, опытно-балансовые — без учета эффекта трансформации воздушной массы. В результате фоновые размеры лизиметрических площадок по сравнению с оптимальными были малы. До последнего времени для полевых экспериментов в производственных организациях применяются лизиметры с необоснованными размерами, т. е. оптимальная площадь их, а также ее вариации в зависимости от природных и водохозяйственных условий не принимаются во внимание.

Критическая глубина испарения грунтовых вод как параметр, зависящий от величины внутригрунтового испарения, высоты капиллярного поднятия влаги и зависимость его от глинистых частиц, взаиморасположения и мощности слоев с различным механическим составом, а также разнообразия естественных и искусственных причин не установлена. Слабо разработаны вопросы влияния запасов влаги на интенсивность испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод, а также их зависимости от вязкостных свойств воды. Недостаточно изучено влияние динамики уровня грунтовых вод в естественно-переменных, искусственно-переменных, постоянных условиях и не учитывается в процессе экспериментальных работ.

Один из главных недостатков экспериментальных работ — их дороговизна, связанная с громоздкостью установок и затратой рабочей силы. Поэтому перед исследователями ставится задача по удешевлению приборов за счет уменьшения габаритности, модернизации и сокращения затрат рабочей силы на их установку с применением геофизических методов, средств автоматизации и механизации труда (получение информации без участия наблюдателя, с дистанционным управлением и передача ее на расстояние). В связи с ростом потока информации остро стоит вопрос о сборе, обработке, расчете результатов исследований на электронно-вычислительных машинах.

Для решения поставленных задач необходимо:

1) определить категории испарения, инфильтрации с учетом достижений современной науки;

2) выработать основные теоретические положения для экспериментальных работ на воднобалансовых станциях, дать методические основы их производства на ключевых участках;

3) установить закономерности формирования испарения, инфильтрационного питания грунтовых вод на основе многолетних лизиметрических исследований в орошаемых районах Узбекистана для разработки методов перехода от точечных данных к площадным характеристикам;

4) разработать предложения по усовершенствованию конструкций приборов и принципиальной основы работ по созданию новой аппаратуры для внедрения в практику экспериментальных работ на воднобалансовых станциях;

5) предложить основы определения точности результатов лизиметрических исследований испарения грунтовых вод и типизации ошибок.

Учитывая неразработанность терминов, мы оперируем следующими категориями испарения и инфильтрации: суммарное испарение, испарение с водной поверхности (испаряемость)[1], испарение с почвенной поверхности, транспирация, испарение грунтовых вод, внутригрунтовое испарение, критическая глубина испарения грунтовых вод, инфлюация, инфильтрация, фильтрация.

При рассмотрении этих вопросов автор базировался на результатах многолетних исследований гидрогеологических и инженерно-геологических партий научно-производственного объединения «Узбекгидрогеология» и использовал опубликованные работы.

Районирование аридной зоны Узбекистана выполнялось на основе климатической увлажненности с использованием данных САНИИРИ, САРНИГМИ с детальным расчетом коэффициентов климатической увлажненности, по Н. Н. Иванову, сухости климата, по М. В. Комаровой, показателю аридности, по Л. Эмбергеру, согласно принципам районирования по структуре баланса, а также суммарного испарения грунтовых вод.

[1] Испарение с предельно насыщенного грунта в отдельные годы и межфазные периоды может быть больше испарения с водной поверхности.

В обработке фактического материала многолетних лизиметрических наблюдений для установления закономерностей формирования испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод участвовали сотрудники лаборатории физического моделирования гидрогеологических процессов и опытно-методической партии института ГидроИНГЕО НПО «Узбекгидрогеология». Раздел монографии «Факторный анализ данных по испарению грунтовых вод» написан Р. Х. Зияевой.

По результатам производственных, опытно-методических работ и научных исследований впервые установлены зависимости испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод от механического состава, минерализации, слоистости грунтов, оптимальной площади лизиметров, деятельного покрова, которые легли в основу разработки переходных коэффициентов.

На основании данных многолетних исследований Б. С. Конькова, М. М. Крылова, А .Ф. Сляднева, Д. М. Кац, М. С. Алимова, Ю. Г. Планина и др. установлены конструктивные, методические, определительские недостатки в лизиметрических исследованиях и предложены рекомендации по улучшению конструкций приборов, методики наблюдений.

В работе обращается внимание специалистов, организаций на объединение научных усилий, финансовых затрат в связи с комплексированием исследований по изучению испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод. Показаны недостатки узковедомственного подхода к данному вопросу на основе многогранности процесса испарения и инфильтрации, а также связи этих процессов с основами биологии, метеорологии, гидрогеологии и других наук.

Приблизить науку к производству, решать в первую очередь производственные вопросы и видеть в этом основу развития науки — главная цель настоящей монографии.

Исследования прошли стадию отраслевого внедрения в гидрогеологических партиях объединения «Узбекгидрогеология» с экономическим эффектом 72,8 тыс. руб., внедрена в САНИИРИ и САРНИГМИ и достигнута эффективность в 29,0 тыс. руб. Имеются потенциальные возможности использования результатов в гидрогеологических партиях Таджикистана, Киргизии, Туркмении, Азербайджана и Южного Казахстана с ожидаемым экономическим эффектом 1,4 млн. руб.

На основе разработок составлены и внедрены «Методические указания по составлению регионального водно-солевого баланса грунтовых вод», «Рекомендации по обработке материалов наблюдений за режимом подземных вод и воднобалансовых исследований».

Автор пользовался консультациями и советами Н. Н. Ходжибаева, Ф. А. Муминова, Н. Ф. Беспалова, Б. Е. Милькиса, М. С. Алимова и О. В. Маленина.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ

КЛИМАТ

Климат орошаемых территорий хлопковой зоны СССР характеризуется засушливостью с коэффициентом сухости от 1,8 в предгорьях Чаткало-Кураминских гор до 149,3 в Кызылкумах. В бассейнах рек Куры и Аракса он изменяется от 1,0 до 47,5, достигая низких значений в Ленкоранской низменности, высоких — в Бакинской мульде. Сухость зависит от годовой суммы атмосферных осадков, их распределения по сезонам года среднемноголетних значений температуры воздуха, испаряемости. На изучаемой территории основная часть осадков (80%) выпадает в зимне-весенний период (октябрь — апрель) и лишь немногим более 10% — летом.

Относительная влажность воздуха в целом остается низкой, и лишь в Ферганской долине благодаря ее замкнутости и защищенности от вторжения воздушных масс летом даже в дневные часы иногда достигает 40%.

Согласно данным УГМС и гидрогеологических станций, годовая сумма атмосферных осадков в предгорных равнинах колеблется от 80 до 470 *мм/год*, иногда снижаясь до 24 (засушливый 1917 г., Репетек) и 11 *мм/год* (1975 г., Ургенч).

Среднемноголетние значения температуры воздуха изменяются от 8,1 до 17,3°С, среднемесячные в июле составляют 37,1°С, экстремальные — от —33,8 до +49,4°С, амплитуда изменения температуры воздуха 83,2°.

В Средней Азии, где установлены аридные, полуаридные и гумидные условия, можно выделить зоны с различной степенью климатической увлажненности. З. Зайнутдинов в 1968 г. определил коэффициент увлажненности для территорий Узбекистана, Таджикистана, Киргизии, Туркмении, на основании которого и дополнительных расчетов по югу Казахстана мы, согласно классификации Н. Н. Иванова, в пределах равнинных территорий выделили следующие зоны: ничтожного, скудного и недостаточного увлажнения с индексом $\leqslant 0{,}12$; 0,13—0,30; 0,30—0,60 соответственно. Необходимо отметить, что в пределах горного обрамления

установлены отдельные участки с коэффициентом 0,61—0,98, а на леднике Федченко — даже 1,29.

Зона недостаточного увлажнения (0,30—0,60) установлена в восточных отрогах Гиссарского хребта, на северо-восточных склонах Пскемского, Чаткальского, на южных склонах Ферганского и Киргизского Алатау, а также на южном окончании Кунгей-Алатау. Если рассматривать равнинную территорию Средней Азии, то зона с недостаточной увлажненностью занимает площадь не более 12,5 тыс. *км*², со скудной — 187,5 тыс. *км*² (верховья долин рек Пянджа, Вахша, Сурхандарьи, Китабо-Шахрисабзская котловина, Зеравшанская долина, Голодная степь, Арысь-Туркестанский орошаемый массив, Чирчик-Ангренский бассейн, восточная половина Ферганской котловины, Чуйская долина и часть орошаемых земель Иссык-Кульской впадины, предгорная равнина Копетдага). Вся остальная равнинная территория Средней Азии характеризуется ничтожным увлажнением.

Согласно Н. Н. Иванову (1954), коэффициент увлажнения представляет собой отношение годовой суммы осадков *(R)* к годовой сумме испаряемости *(E)* за определенный период.

$$K = \frac{R}{E}. \qquad (1)$$

Как видно из уравнения (1), климатическая увлажненность зависит главным образом от осадков, но формируется под влиянием дефицита влажности, температуры воздуха, почвенного покрова, других климатических и орогидрографических факторов. С продвижением вверх по рельефу значения К растут и даже превышают единицу, что зависит не только от величины атмосферных осадков, но и от ориентации хребтов по отношению к движению воздушных масс.

По данным З. Зайнутдинова (1968), изолиния с $K=0{,}12$ проходит по северному склону Копетдага на высоте 200 *м*, северо-западному — 600—650 *м*; южному склону Чаткальского хребта — 860 *м*; северному склону Алайского и Туркестанского хребтов — 600 *м*; в северо-восточной части Кашкадарьинского бассейна — 400—500 *м* над уровнем моря (табл. 1).

Рассмотренные выше критерии аридности и климатическая увлажненность в сочетании во многом определяют направленность гидрогеологического процесса вообще и мелиоративные условия в частности. Если принять аридность за более или менее постоянный фактор, то она может быть усилена в засушливые годы и ослаблена в годы с максимальной водообеспеченностью. Кроме того, природная увлажненность орошаемых районов неодинакова и эту неоднородность можно дифференцировать, учитывая гипсометрическое положение орошаемого района или оазиса, открытость или замкнутость геологических структур, характер простирания основных горных сооружений по отношению к господствующим ветрам, особенности геоморфологических условий и т. д. Поэтому

при установлении мелиоративной направленности необходимо учитывать природную (климатическую) увлажненность, так как она оказывает существенное влияние на процессы испарения грунтовых вод и инфильтрационное питание. В условиях с умеренной увлажненностью (Кура-Араксинская низменность) нормальное значение испарения грунтовых вод при глубине 0,5 *м* на землях, занятых хлопчатником, редко превышает 700 *мм/год*, а в зоне с ничтожной увлажненностью, по данным многолетних лизиметрических исследований Бухарской гидрогеологической станции, — более 1300 *мм/год*. Влага с зеркала грунтовых вод расходуется

Таблица 1

Распределение коэффициента увлажнения и гипсометрические отметки (по З. Зайнутдинову)

Профиль	Коэффициент увлажнения			
	0,12	0,30	0,60	1,00
Ташкент—Чимган	—	680	1440	2440
Мирзачуль—Ахангаран (плато)	—	860	1680	2700
Коканд—устье р. Терс	860	—	—	—
Наманган—устье р. Терс	460	1080	2100	—
Андижан—Ак-Терек—Гава	420	980	1900	3100
Андижан—Гульча	460	1400	3000	—
Фергана—Тамынген	600	2000	—	—
Ура-Тюбе—Шахристан (перевал)	500	3200	—	—
Самарканд—Аманкутан	330	800	1500	—
Камаши—Китаб	440	560	720	—
Гузар—Дехканабад	600	—	—	—
Термез—Байсун	780	1940	—	—
Термез—Ходжа Обигарм	500	860	1460	—
Северный склон Копетдага	200—630	—	—	—

почти в два раза интенсивнее, что не может не повлиять на водно-солевой режим почвогрунтов и в целом на мелиоративное состояние орошаемых земель, если речь идет о сравнительной оценке орошаемых земель, находящихся в различных условиях климатической увлажненности.

Хлопковая зона СССР характеризуется отсутствием поверхностного стока за пределы, а подземный сток в Аральское и Каспийское моря ничтожно мал и практического значения в общем региональном водном балансе не имеет. Отсутствие стока обусловлено недостаточностью естественного увлажнения, максимальной эвапотранспирацией благодаря значительному дефициту влажности воздуха и большим значениям суммарной радиации, достигающей 169 *ккал/см*^{2}.

За последнее десятилетие (1967—1977 гг.) после многоводного 1969 г. маловодные повторялись в 1970 и 1971 гг., 1974 и 1975 гг.

Недостаток увлажнения осложняет водную проблему, предъявляет жесткие требования к экономному использованию имеющихся водных ресурсов.

В настоящее время нет единого понимания термина «аридность», поэтому мы несколько подробнее осветим данный вопрос со ссылкой на опубликованные материалы.

Существует более или менее четкое определение таких понятий как сверхаридный, аридный, полуаридный, субгумидный, гумидный, в некоторой степени разработаны критерии оценки их, основанные главным образом на естественных факторах. Влияние водохозяйственной деятельности человека на природную обстановку и аридность остается неизученным. Наряду с этим существуют нерешенные вопросы в оценке критериев аридности, так как значение каждого фактора зависит от взаимовлияния множества причин: ограниченности территории от вторжения влажных масс воздуха бассейнов, океанов, морей; удаленности от источников влагообеспечения, господствующего направления ветра, своеобразия гидрогеологических условий, интенсивности и масштаба ирригации и т. д.

Причины аридности, с нашей точки зрения, можно было бы разделить на прямые и косвенные, и те и другие могут воздействовать одновременно на климат. К прямым относятся: гипсометрическое положение территории, расчлененность рельефа, защитные действия горных сооружений, удаленность от морей и океанов; климатические — годовая сумма атмосферных осадков, распределение по сезонам года, температура воздуха, высокое значение потенциальной эвапотранспирации, дефицит влажности, колебание температуры почвы, микроклимат; ирригационно-хозяйственные: степень водообеспеченности, дренированность территории, интенсивность землепользования. К косвенным можно отнести: превышение испарения над атмосферными осадками, сухость воздуха (по Комаровой), большая мощность грубообломочного материала и высокая трещиноватость коллекторских пород, растительный покров с небольшой зеленой массой, не обеспечивающий удержание влаги в почве, преобладание автоморфного процесса развития почв, голые почвенные поверхности, способствующие стоку, литогенез с отрицательным водным балансом. Замкнутость поверхностного стока или его завершение бессточными впадинами — следствие аридности.

Аридность условий определяется всем комплексом факторов, но главными являются атмосферные осадки. Ф. Е. Кантак (Мейдж, 1965) для территории Южно-Африканского союза считает, что аридные и полуаридные условия — следствие не столько скудности годового количества осадков, сколько их сезонного распределения. Фернандес де Лара (1965) отмечает: «...атмосферные осадки являются не единственным фактором..., ибо огромное влияние оказывает также микроклимат и другие факторы».

Р. Д. Дхир (1965), анализируя материал по Индии и Пакистану, считает, что аридность, по существу, понятие относительное..., качественное представление об аридности легко получить, детально ознакомившись с местными условиями, но количественное выражение представляет сложную задачу, так как необходимо учитывать действия и взаимодействия большого числа природных факторов. Ж. Друэн (1965) отмечает, что бывают периоды (С-З Африка), порой охватывающие несколько лет, когда не выпадает ни капли дождя.

П. Мейдж (1965) утверждает, что основным фактором, от которого зависят все остальные признаки, является малое количество атмосферных осадков. Он, пользуясь индексом влажности по Тронтвайту (рассчитывается с учетом суммарного испарения, дефицита или избытка воды, атмосферных осадков, температуры в соответствии с широтой местности и показывает дефицит атмосферных осадков по отношению к эвапотранспирации), засушливый климат подразделяет на высокоаридный (57,7 и более), аридный (40—57,7), полуаридный (20—40), субгумидный (0—20). К высокоаридным П. Мейдж относит наименее увлажненные территории, где в течение ряда лет осадки отсутствуют, к аридным— такие условия, когда для выращивания сельскохозяйственных культур осадков недостаточно. Количество осадков полуаридных земель достаточно для выращивания некоторых типов культур.

В хлопковой зоне Советского Союза (согласно показателям П. Мейджа) площади с аридным климатом занимают около 2,3 млн. *км*². Сюда входят Кызылкумы, Каракумы, Устюрт, Туркестанская, Прикаспийская низменности, Голодная степь, часть земель Южного Казахстана, примыкающие к бассейну Аральского моря, дельты северных рек, стекающих в Каспийское море, орошаемые земли в бассейнах Сырдарьи и Амударьи (рис. 1).

О. К. Ланге (1975) отмечает, что природные условия засушливой зоны СССР крайне разнообразны, захватывают не только полупустыни и пустыни: «Южная полоса степной зоны, прилегающая к полупустыням, почти также засушливая и требует оросительных мероприятий». Согласно И. П. Герасимову (1956), «...лесостепь, степь и пустыня. Именно эти три русских понятия с наибольшим основанием возможно трактовать как синонимы термина «аридная зона» и его производные (семиаридная, экстрааридная и т. д.).». Аридный и полуаридный климат, по П. Мейджу, соответствует пустынному и степному.

Л. Эмбергер (Мейдж, 1965) выделяет сверхпустыню, где не бывает осадков в течение, по крайней мере, 12 месяцев наблюдений, а также отсутствует закономерный сезонный ритм осадков (Центральная Сахара, Такла-Макан, Намиб, Атакома). П. Мейдж к указанным районам добавил Аден, Темед, Хургард, Колорадскую пустыню и Долину Смерти.

Наряду с индексом влажности Тронтвайта пользуются показателем аридности, по Л. Эмбергеру, отражающим сухость климата:

$$Q_э = \frac{100R}{(M+m)(M-m)}, \qquad (2)$$

где $Q_э$ — показатель аридности;

M — нормальная максимальная температура самого жаркого месяца;

m — нормальная минимальная температура самого холодного месяца;

R — нормальное суммарное количество атмосферных осадков за год.

В Египте, Судане и Восточной Африке значения $Q_э$ от 0 до 20 соответствуют пустыням, от 20 до 45 — аридным условиям и

Рис. 1. Выкопировка из карты распределения аридных гомоклиматов (П. Мейдж):

1—водная поверхность; условия: *2*—достаточно увлажненные (преимущественно горы), *3*—полуаридные, *4*—аридные; *5*—государственная граница.

от 45 до 65 — полуаридным, которые отвечают (приближенно) величинам годовых осадков в пределах 0—200, 200—400, 400—800 *мм/год*.

А. А. Григорьев (1951), обобщая материалы многолетних исследований по географической зональности на территории Советского Союза, пришел к следующему выводу: изменение строения и развития географической среды (суши) по поясам и подзонам зависит в основном от количества тепла как важнейшего энергетического фактора, влаги и от их соотношения. Количество влаги может быть оптимальным лишь тогда, когда имеется некоторое превышение количества атмосферных осадков над возмож-

ным испарением. М. И. Будыко (1955), используя идею А. А. Григорьева, предложил «индекс сухости» в качестве показателя условий увлажнения, который определяется как отношение радиационного баланса подстилающей поверхности r_0 к скрытой теплоте испарения z_r и имеет вид $\frac{r_0}{Z_r}$. Установлено, что в засушливых зонах он всегда больше 1,1; в степной зоне может достигать 2,3, в пустынно-степной до 3,4 (на юге) и в зоне пустынь превышает эту величину.

М. В. Комарова (1965) в результате районирования Юго-Западного Причерноморья по степени аридности разработала методику расчета коэффициента сухости климата:

$$Q = \frac{E_2 - R}{R - E_1}, \qquad (3)$$

где E_2 — испаряемость;
E_1 — испарение;
R — сумма осадков.

Она предлагает границу между аридной и полуаридной зонами проводить по изолинии с величиной $Q=34$, что достигается в условиях равенства суммы атмосферных осадков и испарения по многолетним данным.

В орошаемых районах Узбекистана (Ферганская котловина) по коэффициенту сухости, предложенному М. В. Комаровой, согласно разработкам О. В. Мудровой и С. А. Крук, установлены территории с аридными, полуаридными, гумидными условиями. К первым относится территория, расположенная западнее линии Маргилан — Наманган — Пап, ко вторым — восточнее, к третьим — высокие предгорья и горное обрамление.

Гидрогеологические условия определяются снежно-ледниковым питанием основных рек — Сырдарьи, Амударьи, Зеравшана и др., полноводье в которых в основном совпадает с вегетационным периодом.

В бассейне р. Зеравшана максимальные расходы поверхностного стока формируются в основном с середины апреля до июля, спад происходит с августа до марта. Расход реки изменяется от 20,0 до 252 *м³/сек*, минерализация — от 0,3 до 3,0 *г/л*.

Река Сырдарья — житница Голодной степи и Ферганской долины, снежно-ледникового питания с двумя паводками в апреле—мае и июле. Среднемесячный расход по посту Кызылкишлак изменяется от 114 до 2220 *м³/сек*, среднегодовой — от 224 до 917 *м³/сек*. Минерализация воды, по данным 1937—1939 гг., изменялась от 0,25 до 0,62 *г/л*, в связи с ростом дренажного сброса в 1968 году составила 0,85—1,37 *г/л*.

Река Амударья по гидропосту Чатлы имеет расход 340 *м³/сек* (март), 2960 (май), мутность — от 0,15 до 12,0 *кг/м³*, годовой сток взвешенных наносов — 129 млн. *т*. Среднемноголетняя минерализация поверхностной воды — 0,47 *г/л*, изменяется от 0,23 до 0,92 *г/л*, в 1947 г. превысила 1,0 *г/л* в связи с маловодьем и за счет дренажного сброса. Согласно расчетам Р. С. Кадырова, в Хорезмском и Турткульском оазисах в магистральные каналы попадает значительное количество сбросных вод, что в 1975 г. соответственно составило 36,8 и 25,0% от водоподачи.

В долине р. Сурхандарьи, степях Кызырык-Дара и Шерабад в связи с недостатком оросительных вод намечена переброска воды из Амударьи по Аму-Зангскому каналу. Сурхандарья со среднегодовым расходом 69,3 *м³/сек* дренирует подземные воды до 20% годового стока, минерализация поверхностной воды изменяется от 0,2 до 1,24 *г/л*.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Гидрогеологические условия орошаемых территорий аридной зоны СССР формируются в результате комплексного воздействия климатических факторов, генетических и фациально-ландшафтных особенностей, обусловленных внутренними причинами, связанными с неотектоническими процессами, а также проявлением их в дифференциации отложений, биохимических особенностях условий их формирования — бессточности межгорных впадин, малых количеств осадков, высокой температуры, испаряемости и т. д. Поверхностный сток — основной источник питания грунтовых вод. Так, в Шерабад-Сурхандарьинском бассейне он составляет 80%. В Бухаро-Каракульском районе в инфильтрационном питании грунтовых вод на долю ирригационных приходится 80—90%. В Северном Таджикистане в большинстве случаев доминирующим (90—99%), исключительно мощным и постоянно действующим источником в приходной части баланса грунтовых вод являются фильтрационные потери поверхностных вод — до 30—50% от водозабора в оросительные системы. В Азербайджанской ССР потери в каналах составляют 36,5—25% от головного водозабора.

Низкие фильтрационные свойства и незначительная водопроводимость покровных отложений ограничивают возможности регионального оттока; основная разгрузка происходит вертикально как следствие испарения с дневной поверхности. По расчетам М. М. Иногамова, Б. М. Мансурова, М. Абдуллаевой, в Бухарском оазисе за 1967 г. подземный отток вместе с дренажным составил 14,58 *м³/сек*, испарение грунтовых вод — 15,66 *м³/сек*, в Каракульском оазисе — 2,02 и 3,99 *м³/сек* соответственно. Вертикальная разгрузка на орошаемых массивах — определяющий фактор в балансе грунтовых вод, что превышает сумму подземного и дренажного стока в Бухарском оазисе на 1,08 *м³/сек*, Каракуле — на 1,97 *м³/сек*.

В Голодной степи, согласно данным М. С. Алимова, в условиях орошаемого земледелия, близкого залегания грунтовых вод, при величине испаряемости 1256—1789 *мм/год*, среднегодовой темпе-

ратуре 13,3—14,8°С разгрузка составляет 45,41 *м³/сек*, тогда как сумма остальных статей расходования грунтовых вод не превышает 38,82 *м³/сек*.

В Чирчик-Ангренском бассейне в отличие от Бухарского оазиса и Голодной степи испарение грунтовых вод (10,08 *м³/сек*) намного меньше суммы (62,85 *м³/сек*) остальных расходных статей баланса, который составляют подземный сток — 2,98, выклинивание — 5,50, эксплуатационный водозабор из скважин — 13,32, дренажный сток — 30,97 *м³/сек* (М. С. Алимов, М. Абдуллаева). Испарение грунтовых вод в три раза меньше, чем дренажный сток, в пять с лишним раз меньше, чем сумма всех расходных элементов баланса.

Испарение грунтовых вод в Кура-Араксинской низменности при дренажном стоке 0,4 *км³/год*, подземном оттоке в Каспийское море 0,06 *км³/год* составляет 2,56 *км³/год*.

В межгорных впадинах водоносные горизонты четвертичных отложений образуют единый бассейн формирования подземного стока, взаимоотношение грунтовых и субнапорных вод здесь различное. Общая гидродинамическая картина усложняется дренирующим влиянием коллекторно-дренажной сети, а также действием бугров ирригационно-грунтовых вод с максимумом в середине вегетационного периода, который к концу его срабатывается почти полностью. В Ферганской долине уровень напорных вод в подстилающих отложениях выше грунтовых, приуроченных к покровным супесчано-суглинистым отложениям, на 0,1—0,8 *м*, в Шерабадском конусе выноса — 1,0 *м*. В Кура-Араксинской низменности первый напорный горизонт слабоводообилен, величина напора изменяется от 11 до 99,5 *м* выше кровли горизонта, увеличивается с удалением от предгорий и достигает максимума в Прикуринской зоне. Глубина залегания первого горизонта напорных вод изменяется от 136,6 до 18,2 *м*.

На орошаемых землях в дельтах крупных и средних рек субнапорные воды отсутствуют, за исключением Бухарского оазиса, где в линзовидных прослойках галечника местами наблюдается слабая напорность. Необходимо отметить, что при незначительной мощности четвертичных покровных образований грунтовые напорные воды питают меловые и неогеновые отложения.

Водоносные горизонты четвертичных образований характеризуются большими мощностями (в Ферганской долине — более 700 *м*, Северном Таджикистане — около 600 *м*). В Азербайджанской ССР (Аджиноур) мощность древних аллювиально-пролювиальных отложений достигает 600—700 *м*; современных образований в конусах выноса рек Алазань-Автранской долины — 200 *м* и более.

Грунтовые воды в дельтовых равнинах залегают неглубоко, за исключением останцовых возвышенностей и песчаных пространств. В орошаемых районах хлопковой зоны СССР грунтовые воды находятся на глубине 1—3,3—5 *м* (старая зона орошения), а на новоорошаемых землях на 5—10 *м* и глубже. В верховьях конусов выноса уклон зеркала грунтовых вод составляет 0,01—0,02; в срединных частях — 0,003—0,005, на периферии — 0,0001—0,0002. Минерализация изменяется от 1,0 *г/л* вдоль ирригационных каналов до 50 *г/л* в бессточных впадинах и солончаковых понижениях. Плотный остаток колеблется в пределах 1,2—50,8 *г/л*. Состав гидрокарбонатный и гидрокарбонатно-сульфатный на периферии межгорных впадин; сульфатный, сульфатно-хлоридный — в центральной зоне, дельтах рек, редко хлоридный — в понижениях рельефа.

Для полноты краткого обзора гидрогеологических условий Среднеазиатских республик, Южного Казахстана необходимо указать на одно исключительное обстоятельство в связи с формированием мелиоративной обстановки в приморской полосе долины р. Куры. Здесь отметки уровня моря (—27 *м*) выше зеркала грунтовых вод приморской полосы (—30 *м*), что создает обратный уклон с величинами порядка 0,0001. Это является доказательством бессточности межгорных впадин в условиях аридного климата.

В аридной зоне СССР за период стационарных гидрорежимных наблюдений (1925—1976 гг.) установлены закономерности формирования многолетнего режима грунтовых вод, которые показали, что уровенные и гидрохимические особенности создаются под воздействием ряда факторов (природных и хозяйственных), причем прослеживаются периодические колебания продолжительностью — 22, 11,6—7,4 года. Для неорошаемых территорий главнейшие — атмосферные осадки, динамика которых подчинена ритмическим колебаниям климата, связанным с солнечной активностью.

Многолетний режим грунтовых вод в орошаемых районах формируется вследствие преобладания искусственного фактора — орошения и мелиорации земель. Но и здесь прослеживается определенная связь с колебаниями климата, воздействующими на режим поверхностного стока, водообеспеченность ирригационных систем, естественную увлажненность.

Из теории изменчивости общей увлажненности материков северного полушария следует, что ей свойственны ритмические колебания различной продолжительности. Наиболее ясно выражен продолжительный ритм длительностью несколько менее 2000 лет. Он делится на три крупные фазы: 1) с условиями прохладно-влажными, 300—500 лет; 2) теплую и сухую, 600—800 лет; 3) переходную между первой и второй, 700—800 лет.

Н. Н. Кенесарин (1959) по продолжительности циклов выделил вековые (80 лет), полные (67 лет), большие (33 года), малые (11 лет) и очень малые (2—4 года). Продолжительность регулярных наблюдений за режимом подземных вод в Узбекской ССР — 51 год, в связи с чем в настоящее время подтверждена почти во всех климатических зонах периодичность в 11 лет с продолжительностью, изменяющейся от 9 до 13 лет.

В аридной зоне в определенной природной обстановке колебания уровня грунтовых вод происходят в 20—22-летний цикл. Если 11-летняя цикличность не вызывает сомнений, так как хорошо согласуется с установленной 11-летней ритмичностью деятельности солнца, то существование 20—22-летних ритмов требует объяснений.

Материалы исследований Сурхандарьинской и Ферганской гидрогеологических партий объединения «Узбекгидрогеология» показали, что в предгорьях два цикла солнечной активности выражаются одним циклом атмосферных осадков, расхода рек, следовательно, и положения уровня грунтовых вод. Подобное слияние ритмов, а также несоответствие максимума или минимума изменения расхода рек и разнохарактерность отставания их экстремальных значений от солнечной активности и атмосферных осадков обусловливаются, во-первых, многолетним накоплением атмосферных осадков на высокогорьях, во-вторых, отдаленностью и гипсометрическим положением областей питания, в-третьих, регулирующей емкостью водовмещающих пород, в-четвертых, квазиритмичностью комплексного влияния космических факторов и т. д. Сочетание непостоянства в проявлении солнечной активности и зависящих от него изменений метеорологических условий и расхода рек с особенностями литологического состава и структуры водовмещающих пород, дренированностью территорий и другими факторами вызывает различную направленность колебаний уровня грунтовых вод в многолетнем разрезе. Характерный для поверхностного стока 20—22-летний цикл прослеживается в колебаниях уровня грунтовых вод, формирующихся в грубообломочных породах предгорных зон, конусов выноса и нижних террас рек.

Связь солнечной активности и многолетнего колебания уровня грунтовых вод наиболее четко проявляется в условиях с недостаточным природным увлажнением, свойственным орошаемым землям аридной зоны. Здесь уровенный режим грунтовых вод формируется под определяющим влиянием орошения и дренированности территории. Наибольший подъем наблюдается в дренированных и слабодренированных землях.

В Чирчик-Ангренском бассейне многолетняя амплитуда колебания уровня грунтовых вод достигает 2,83 *м/год*, в Сурхандарьинской впадине — 3,65 *м/год*.

В центральной части Голодной степи на новоорошаемых землях с достаточно мощными тяжелыми грунтами в условиях слабой дренированности за счет образования «верховодки» уровень поднимается более чем на 5 *м/год*. «Верховодка» образуется также в Каршинских степях и Кызырык-Даре.

Один из параметров многолетнего режима грунтовых вод — величина многолетнего спада и подъема уровня, которые наиболее ощутимы на новоорошаемых землях и определяются начальной глубиной залегания, а также интенсивностью питания водоносной толщи инфильтрационными водами.

По данным скв. 290, расположенной в дельте Амударьи, на новоорошаемом участке грунтовые воды за 1953—1963 гг. поднялись с глубины 11,45 до 3,05 *м*; в Вахшской долине по скв. 198 за 1951—1958 гг. до 11,23 *м*.

Таблица 2

Типы режима грунтовых вод

Естественный			Нарушенный							
Климатический	Горный	1. Высокогорный 2. Среднегорный и низкогорный	Ирригационный	Установившийся						2. Приканаль-ный
				1. Региональный						
	Равнинный	1. Предгорный 2. Пустынный		Нерегулируемый			Регулируемый			
Гидрологический	Приречный	1. Постоянного питания 2. Нарушенного питания и дренирования		Ирригационно-гидрогеологический	Ирригационно-гидрологический	Ирригационно-климатический	водоподачей	водоподачей и вертикальным дренажем	вертикальным дренажем	
	Региональный	Подгорно-веерный								
Гидрогеологический		1. Транзитного стока грунтовых вод 2. Восходящего питания грунтовых вод								
			Неустановившийся (переходный)							
			Режим прибрежных зон водохранилищ							

Так, амплитуда колебания уровня грунтовых вод в Ферганской долине составила 0,6—1,6 *м*, в Приташкентском р-не—2,75—2,83, Голодной степи — 1,0—2,2, Бухарском оазисе — 0,63—2,7, Чуйской долине 0,27—1,97, Хорезмском оазисе — 0,65—1,69, Теджен-Мургабском оазисе — 0,96—2,83 *м*. На староорошаемых землях с установившимся режимом грунтовых вод величина и ско-

рость подъема уровня изменяются менее интенсивно с определенной периодичностью. Амплитуда колебания уровня грунтовых вод староорошаемых земель колеблется от 0,27 до 2,83 *м*, что свидетельствует об установившемся здесь режиме.

На землях с незарегулированным головным водозабором и вблизи водных артерий, в зоне непосредственного влияния ритмичность многолетнего режима грунтовых вод наиболее четкая, и землях с гидрологическим и ирригационно-гидрологическим типами многолетнего режима проявляется наиболее тесная связь с природным фактором на общем фоне влияния ирригации и орошения.

Анализируя многолетний режим грунтовых вод Бухарского оазиса за 1945—1950 гг., Д. М. Кац (1967) указывал, что в результате отсутствия в оазисе транзитного стока и неошлюзованности головных водозаборов подача воды в ирригационные системы была принудительной, при максимальных расходах р. Зеравшан происходил высокий водозабор, а при низких — меньший приток поверхностных вод по оросителям.

На территориях, тяготеющих к ирригационному типу многолетнего режима, большинство из которых имеет более или менее зарегулированный водозабор, ритмичность многолетнего режима грунтовых вод выражена менее, что, видимо, связано с оптимальным водозабором, который определяется исходя из климатических условий и целесообразности поливных норм.

На основании наблюдений гидрогеологических партий нами выделены следующие типы режима: климатический, ирригационный, ирригационно-гидрологический, гидрологический, гидрогеологический (табл. 2).

Тип режима	*Площадь распространения (геоморфологические регионы, участки)*
Климатический	Горные сооружения, песчаные пустыни, останцовые горы и возвышенности, адыры, образованные коренными породами, внутригорные впадины
Ирригационный	Орошаемые части предгорных равнин, надпойменных террас речных долин, субаэральных дельт, межгорных депрессий с развитой ирригационной и коллекторно-дренажной сетью
Ирригационно-гидрологический	Орошаемые части межадырных и заадырных впадин предгорных равнин, средних и верхних частей конусов выноса рек. Дельты рек с оазисным орошаемым земледелием, находящиеся под гидравлическим влиянием крупных рек.
Гидрологический	Современные долины рек (пойма, I и II надпойменные террасы)
Гидрогеологический	Неорошаемые части предгорий, галечниковые участки конусов выноса рек, высокие террасы речных долин

На изучаемой территории, кроме вышеуказанных, фиксируются промежуточные типы многолетнего режима. Ниже дана группировка основных источников питания и расходования грунтовых вод по типам режима:

Климатический—атмосферные осадки, конденсация.
Ирригационный—потери на полях орошений, из ирригационной сети, незначительный подземный приток.
Ирригационно-гидрологический—то же, фильтрационные потери из естественных водотоков.
Гидрологический—потери из естественных водотоков, незначительный подземный приток.
Гидрогеологический—подземный сток, незначительное питание за счет атмосферных осадков и конденсации.

Основные факторы расходования грунтовых вод для климатического, гидрологического, гидрогеологического типов многолетнего режима грунтовых вод: подземный отток, испарение и выклинивание в естественные понижения. Для ирригационного и ирригационно-гидрологического характерны испарение, коллекторно-дренажный сток, выклинивание в естественные понижения, незначительный подземный отток.

Ход многолетнего режима уровня грунтовых вод формируется повсеместно под влиянием климатического фактора, однако характер кривой уровенного режима грунтовых вод согласуется с многолетним режимом, свойственным данному типу режимообразующих факторов: на орошаемых землях — это водоподача, коллекторно-дренажный сток, испарение, естественная дренированность; на неорошаемых соответственно типам режима грунтовых вод — их основные режимообразующие факторы.

По результатам анализа материалов исследований режима грунтовых вод Средней Азии и Южного Казахстана В. А. Гейнц, К. Г. Ганиев, А. А. Мадмаров установили следующую схему типизации многолетнего режима. На рассматриваемой территории выделены естественный и нарушенный (деятельностью человека) типы многолетнего режима. Первый включает в себя источники питания грунтовых вод, определяющие многолетние колебания, — климатический, гидрологический, гидрогеологический. Ко второму относится динамика, находящаяся под влиянием ирригационного фактора, она делится на установившуюся и неустановившуюся. В ирригационном установившемся типе многолетнего режима выделены региональный и приканальный подтипы. Региональный подтип подразделяется на нерегулируемый и регулируемый. Первый по значимости основного режимообразующего фактора делится на собственноирригационный, ирригационно-гидрогеологический, ирригационно-гидрологический, ирригационно-климатический. Второй — на регулируемый водоподачей, водоподачей и вертикальным дренажем и только вертикальным дренажем. В нарушенном типе в особую группу отнесен режим грунтовых вод прибрежных зон водохранилищ.

На землях с установившимся ирригационным режимом параметры (амплитуда, скорость подъема уровня, динамика минера-

лизации грунтовых вод) характеризуются относительной стабильностью.

На землях недавнего, нового, орошения с ирригационно-неустановившимся режимом за многолетний период наблюдается непрерывный подъем уровня грунтовых вод, изменение минерализации и химического состава. Параметры многолетнего режима значительно изменяются, стабилизируясь после достижения критической глубины, и определяются комплексным влиянием орошения, дренажа, климатических и подземных составляющих на фоне естественной дренированности.

Экспериментальные работы должны планироваться с учетом закономерностей формирования многолетнего режима грунтовых вод. Постоянные или базовые объекты водно-балансовых исследований, предназначенные главным образом для разработки теоретических вопросов, методов исследований, опробования новых конструкций приборов, могут быть расположены на орошаемых землях, а временные должны охватывать земли перспективного и нового орошения с неустановившимся режимом грунтовых вод. Это позволит учесть на каждом этапе различные условия под воздействием ирригационно-хозяйственного вмешательства человека в окружающую среду.

В аридной зоне СССР горноскладчатые районы и равнинные территории существенно отличаются структурой водного баланса. Горные районы благодаря своеобразному гипсометрическому положению и геологическому строению, выражающемуся в сильной тектонической нарушенности, наличии маломощного чехла четвертичных отложений, ряда геоморфологических особенностей, режима рек, сильной расчлененности, характеризуются преимущественно однокомпонентностью приходной и многокомпонентностью расходных статей водного баланса, что приводит к асимметричной структуре в целом:

$$\mu_{\Delta h} = X - [W_2 + Y_2 + Z + I_2]. \quad (4)$$

Равнинные территории, расположенные гипсометрически ниже и являющиеся областями аккумуляций, характеризуются симметричной структурой водного баланса в целом:

$$\mu_{\Delta h} = [X + W_1 + Y_1 + I_1] - [W_2 + Y_2 + Z + I_2]. \quad (5)$$

Отдельные зоны или геоморфологические единицы обнаруживают асимметричность, что, конечно, обусловливается рядом природных и водохозяйственных причин.

На орошаемых территориях структура водного баланса отличается от горной области тем, что появляются дополнительные факторы приходной и расходной статей баланса. Мы приводим пример балансового районирования Ферганской долины (табл. 4), где Ферганская котловина принята за балансовый регион; правобережная, левобережная части долины р. Сырдарьи, депрессии Восточной Ферганы, впадины Северной Ферганы, депрессия 40-й

Таблица 3

Доля элемента (%) регионального баланса подземных вод в орошаемых районах Узбекистана по отношению к сумме приходных или расходных статей за 1967 г. (составил М. С. Алимов)

Элемент баланса	Орошаемый район											
	Кермине-Ксимех	Бухарский оазис	Каракульский оазис	Китабо-Шахрисабская котловина	Каршинская степь	Зеравшанская впадина	Хорезмский оазис	Каракалпакия	Сурхандарьинская впадина	Голодная степь	Чирчик-Ангренский бассейн	Ферганская котловина
Приход												
Подземный приток	26,89	1,71	2,25	59,23	31,0	19,1	—	—	26,3	10,3	16,0	7,1
Инфильтрация осадков	13,51	11,50	15,30	1,81	9,0	6,8	—	—	4,4	4,2	3,0	1,1
Инфильтрация на орошаемых полях	35,50	45,09	54,35	3,51	8,8	18,7	24,17	45,0	30,0	43,6	39,0	14,5
Инфильтрация из каналов	17,70	41,60	28,10	35,45	51,2	27,4	75,83	33,5	39,3	41,9	42,0	77,3*
Инфильтрация в естественных водотоках						28,0		21,5				
Расход												
Подземный отток	7,44	1,78	1,2	33,88	0,5	1,2	0,09		29,3	0,4	4,9	0,01
Дренажный сток	59,70	41,45	32,15	8,95	4,4	44,0	38,21	10,2	28,4	36,4	48,0	18,5
Испарение грунтовых вод	31,56	46,42	65,85	10,73	90,0	42,4	60,75	78,5	26,9	51,4	17,0	26,4
Отбор подземных вод	1,30	10,34	0,90	9,26	5,1	17,4	1,0	0,2	3,3	3,7	22,0	5,7
Выклинивание в естест. понижении	—	—	—	37,18	—	—	—	11,1	8,8	2,3	9,0	53,8

* Потери из каналов + потери в естественных водотоках

Таблица 4

Структура водного баланса грунтовых вод Ферганской котловины за 1975 г.

Индекс балансового района	Индекс балансового участка	Приходные элементы									Расходные элементы							Примечание
		$W^{к}_{1}$	$W^{р}_{1}$	$U^{1}_{ф}$	$U^{2}_{ф}$	$U^{3}_{ф}$	$U^{4}_{ф}$	$U^{5}_{ф}$	I_1	K	$W^{ф}_{2}$	$W^{а}_{2}$	$U_{д}$	$Y_{е}$	Z	$Q_{э}$	I_2	
A_1—Левобережье долины р. Сырдарьи																		
A_1—I		+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+		+	
A_1—II	A_1—II—1	+	+	+	+				+		+	+			+		+	Песчаные массивы
	A_1—II—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+	+		
	A_1—II—3	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+		
	A_1—II—4	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	
	A_1—II—5	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+		+	
A_1—III	A_1—III—1	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	Песчаные массивы
	A_1—III—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+	+	+	
	A_1—III—3	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	
	A_1—III—4	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	
	A_1—III—5	+	+	+	+				+	+	+	+		+	+		+	
A_1—IV	A—IV—1	+	+	+	+					+	+	+			+		+	Песчаные массивы
	A_1—IV—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+	+	+	
	A_1—IV—4	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	
	A_1—IV—5	+	+	+	+				+	+	+	+		+	+		+	
A_1—V	A_1—V—1	+	+	+	+				+		+	+			+		+	
	A_1—V—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+		
	A_1—V—4	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	
	A_1—V—5	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+	+	+	

Продолжение табл. 4

Индекс балансового района	Индекс балансового участка	Приходные элементы									Расходные элементы							Примечание
		$W^{к}_{1}$	$W^{р}_{1}$	$U^{1}_{ф}$	$U^{2}_{ф}$	$U^{3}_{ф}$	$U^{4}_{ф}$	$U^{5}_{ф}$	I_1	K	$W^{ф}_{2}$	$W^{а}_{2}$	$Y_{д}$	$Y_{е}$	Z	$Q_{э}$	I_2	
A_2—Правобережье долины р. Сырдарьи																		
A_1—I		+		+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	
A_2—II		+	+	+	+						+	+			+		+	
A_2—III	A_2—III—1	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_2—III—2	+	+	+	+						+	+		+	+		+	
A_2—IV	A_2—IV—1	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_2—IV—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_2—IV—3	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	
A_2—V	A_2—V—1	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_2—V—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_2—V—3	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	
A_2—VI	A_2—VI—1	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_2—VI—2	+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	
	A_2—VI—3	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+	
A_2—VII		+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	
A_3—Депрессии Восточной Ферганы																		
A_3—I	A_3—I—1	+	+	+	+	+	+		+		+	+			+		+	
	A_3—I—3	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	

Продолжение табл. 4

Индекс балансового района	Индекс балансового участка	Приходные элементы							Расходные элементы							Примечание
		$W_1^к$	$W_1^р$	$U_ф^1$	$U_ф^2$	$U_ф^3$	$U_ф^4$	$U_ф^5$	l_1	K	$W_2^ф$	$W_2^а$	$Y_л$	$Y_е$	Z	$Q_э$	l_2	
$А_3$—II	$А_3$—II—1	+++	+++	+++	+++				+++		+++	+++	+	++	+++	++	+++	
	$А_3$—II—2						++											
	$А_3$—II—3					++												
Б—Впадины Северной Ферганы																		
Б—I		+++	+++	+++	+++				+++		+++	+++			++++		+++	
Б—II		+++	+++	+++	+++													
Б—III		+++	+++	+++	+++	+++	++++											
Б—IV																		
Б—V																		
В—Депрессии 40-й параллели																		
В—I		+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	—
В—II		+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	—
В—III		+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	—
В—IV		+	+	+	+	+	+		+		+	+		+	+		+	—
В—V		—	+	—	—	—	+		—		—	—		—	—		—	—

Примечание. $W_1^к$—приток грунтовых вод фронтальный и по контакту Q-отложений с коренными породами; $W_1^р$—по аллювию речных долин; $U_ф^1$—инфильтрационное питание грунтовых вод за счет атмосферных осадков; $U_ф^2$—потерь в естественных водотоках, $U_ф^3$—в искусственных водотоках; $U_ф^4$—на полях орошения; $U_ф^5$—из водохранилищ; l_1—глубинное питание грунтовых вод; K—конденсационное питание; $W_2^ф$—фронтальный отток; $W_2^а$—локальный отток; Y_g—дренажный сток; $Y_е$—выклинивание в естественные понижения; Z—испарение грунтовых вод; $Q_э$—эксплуатационный отбор грунтовых вод; l_2—глубинный отток грунтовых вод.

параллели — балансовые области; конусы выноса рек, террасы р. Сырдарьи, песчаные массивы — районы; гидродинамические зоны — участки.

Анализ материалов (табл. 4) показывает, что на орошаемых землях приходная и расходная части — многокомпонентные, т. е. существует симметричная структура водного баланса. Количественный состав элементов баланса грунтовых вод различен в зависимости от гидродинамических зон, мощности зоны аэрации, соотношения уровня грунтовых и субнапорных вод, источников питания и расходования.

В каждом орошаемом районе в зависимости от природных и водохозяйственных условий формируется специфический баланс подземных вод с различным соотношением каждого элемента в сумме приходных и расходных статей. Если для всех оазисов аридной зоны характерно преобладание испарения и инфильтрационного питания над всеми остальными составляющими, то для подземного и дренажного стока, отбора подземных вод, естественного выклинивания, это не наблюдается, ибо наличие каждого составляющего в структуре баланса подземных вод и их доля зависят от множества естественных и искусственных факторов и их взаимовлияния. Для иллюстрации приводим результаты расчета регионального баланса подземных вод, выполненного коллективом авторов под руководством М. С. Алимова в 1967 г. (табл. 3).

В районах с обеспеченной естественной дренированностью (Китабо-Шахрисабзская котловина, Зеравшанская впадина) подземный приток составляет 59,23—19,1% от суммы приходных статей баланса подземных вод. В оазисах естественно недренированных (Бухарский, Каракульский) подземный отток минимальный и не превышает 1,78% от суммы расходных статей баланса грунтовых вод.

В Ферганской впадине и Чирчик-Ангренском бассейне инфильтрационные потери в каналах на 42% превышают приходную часть баланса. Наибольшая доля дренажного стока наблюдается в Кермине-Кенимехском (59,7%), Чирчик-Ангренском (48%), Зеравшанском (44%) орошаемых районах.

Испарение грунтовых вод в Каракульском оазисе составляет 65,85%, Хорезме — 60,75, Каракалпакии — 78,5, в Каршинской степи — 90%, инфильтрация атмосферных осадков и отбор подземных вод не превышают 22%.

Приведенные цифровые характеристики доли каждого элемента водного баланса не постоянные, изменчивы в зависимости от направленности ирригационно-хозяйственного влияния человека. В межгорных впадинах величина подпитывания грунтовых вод снизу колеблется от 10 до 15%. В условиях осушения земель вертикальным дренажем за счет субнапорных водоносных горизонтов на отдельных участках она может превышать 30%. Так, в Центральной Фергане в зоне интенсивной разгрузки подземных

вод величина питания грунтовых вод снизу в период действия скважины вертикального дренажа составила 34%.

По данным А. С. Шамукова, на участке Малик сток по дренам равен 45%, под воздействием эксплуатационных скважин он уменьшился до 25%, в связи с появлением новой статьи баланса— перетока вниз (97,2 *мм/год*), что составило около 20% суммы расходных статей баланса грунтовых вод.

При расположении ключевых участков на мелиоративно неблагополучных землях следует учитывать запросы проектировщиков по эффективности изучения систем горизонтального и вертикального дренажа для получения основных параметров водно-солевого баланса в связи с изменением структуры и учетом особенностей формирования приходных и расходных статей в различных геоморфологических и гидрогеологических условиях под влиянием искусственных факторов, которые могут изменить мелиоративное состояние земель.

В настоящее время единого мнения в понимании некоторых терминов и категорий, связанных с балансом подземных вод, не существует, поэтому считаем необходимым изложить нашу точку зрения по определению таких понятий, как региональный, зональный, локальный баланс, граничные условия балансового района, расчетный период, так как они относятся к основам организации водно-балансовых исследований и интерпретации данных.

Региональный баланс — водный или солевой структурно выделенной геологической единицы с установленными граничными условиями, которая может быть определена на геологической, геоморфологической или гидрогеологической карте. В свою очередь он может быть подразделен на баланс: подземных и грунтовых вод, зоны аэрации. Каждый из них по преобладающей культуре, засеваемой на той или иной территории, может подразделяться на следующие: балансы хлопковых, люцерновых, кенафных кукурузных, рисовых полей и т. д. В зависимости от метода орошения они делятся на балансы: бороздкового, машинного, подпочвенного орошения и дождевания и т. д.

В зависимости от способа осушения указанных земель с установленным способом орошения в дальнейшем баланс дифференцировать можно так: баланс земель осушения горизонтальным, биологическим, вертикальным или комбинированным дренажем.

Указанная типизация водного и солевого баланса для уточнения структуры и оценки доли каждого элемента по отношению к сумме составляющих позволит получить оценку с учетом природных условий, а также площади распределения сельхозкультур, способа орошения и осушения.

Зональный баланс — водный и солевой в пределах гидродинамических зон грунтовых или субнапорных вод с установленными природными граничными условиями (по карте). Региональный и зональный водно-солевой баланс может быть составлен в граничных условиях — поверхность земли, региональный водоупор (табл. 5).

Локальный баланс — водный и солевой составляется обычно без установления природных границ — для ирригационной системы или ее части, земельной карты, оконтуренной оросителем, дреной или коллектором.

Существует несколько вариантов установления граничных условий балансового слоя: в пространстве, времени, схеме расчета. Каждый гидрогеологический район характеризуется большим разнообразием геоморфологических, гидрогеологических, климатических, почвенных, ирригационно-хозяйственных условий. Балансовые характеристики, полученные на экспериментальных воднобалансовых площадках, переносить на большие земельные массивы невозможно из-за различия в литологическом строении, глубине залегания подземных вод, водопроницаемости отложений, гипсометрических, климатических, почвенных условиях, густоте коллекторно-дренажной, ирригационной сети на прилегающих участках.

Исходным материалом для расчета регионального водно-солевого баланса могут служить: 1) геологическая и гидрогеологическая документация разведочных, разведочно-эксплуатационных и эксплуатационных скважин; 2) результаты гидрогеологических, инженерно-геологических, а также геофизических исследований; 3) режимные наблюдения гидрогеологических станций, райводхозов, управлений оросительных систем; 4) метеорологические сведения по данным Управления гидрометслужбы; 5) данные по водоподаче и дренажному стоку, химические анализы; 6) опубликованные работы и другие материалы научно-исследовательских и проектных организаций и др.

Составляются следующие карты:

1) фактического материала по разведочным и эксплуатационным скважинам на воду, необходимая для построения гидрогеологических профилей при подсчете подземных составляющих. Собираются данные гидрогеологических исследований в скважинах, а также сведения по глубине залегания регионального водоупора;

2) геоморфолого-литологического районирования для выявления особенностей литологического строения зоны аэрации, необходимого при дифференцированном определении площадного испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод;

3) размещения наблюдательных пунктов сети МГ СССР, ММ и ВХ, МСХ и др. по изучению режима подземных вод. Собираются данные об уровенном режиме для определения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод;

4) размещения ирригационной и коллекторно-дренажной сети для нахождения линейных фильтрационных потерь в оросительной сети, дренажного стока. Привлекаются материалы о расходах, к.п.д. оросительной сети и дренажном модуле;

5) растительности и сельскохозяйственных культур для определения площадной инфильтрации и испарения на полях ороше-

Таблица 5

Схема разделения регионального баланса

Водный						Солевой					
подземных вод		грунтовых вод		зоны аэрации		подземных вод		грунтовых вод		зоны аэрации	
зональный	локальный	локальный	зональный	зональный	локальный	зональный	локальный	зональный	локальный	зональный	локальный

↓

хлопковых, люцерновых, кукурузных, рисовых, кенафных полей и др.

↑

бороздкового полива				лиманного орошения				подпочвенного орошения				дождевания				орошения напуском				орошения по чекам			
биологического дренажа	горизонтального дренажа	вертикального дренажа	комбинированного дренажа	биологического дренажа	горизонтального дренажа	вертикального дренажа	комбинированного дренажа	биологического дренажа	горизонтального дренажа	вертикального дренажа	комбинированного дренажа	биологического дренажа	горизонтального дренажа	вертикального дренажа	комбинированного дренажа	биологического дренажа	горизонтального дренажа	вертикального дренажа	комбинированного дренажа	биологического дренажа	горизонтального дренажа	вертикального дренажа	комбинированного дренажа

ния. Собираются также сведения о сельскохозяйственном обороте различных культур на основе травопольной системы;

6) гидромодульного районирования для выявления фильтрационных потерь на полях орошения;

7) распределения атмосферных осадков для определения инфильтрации осадков, сопровождающаяся табличными данными о годовых суммах;

8) регионального водоупора с указанием возраста и мощности четвертичных отложений размытых участков регионального водоупора;

9) годовых амплитуд колебания уровня грунтовых вод для оценки результатов балансовых расчетов;

10) химического состава и минерализации грунтовых вод для региональных прогнозов влияния орошения и ирригационно-дренажных сооружений на режим грунтовых вод и направленность гидрогеологического процесса;

11) гидроизогипс и глубин залегания грунтовых вод для оценки дренированности территорий и направления подземного стока;

12) гидроизогипс и пьезоизогипс субнапорных вод четвертичных отложений для оценки взаимосвязи грунтовых вод с напорными, а также дренированности территорий;

13) схема размещения опытных участков экспериментальных площадок с указанием параметрических скважин и всего комплекса приборов и аппаратуры.

Обоснование границ балансового региона

Нижняя граница балансового слоя устанавливается по региональному или относительному водоупору. Карта строится на основе геологических данных по изучаемому району с показанием в изолиниях кровли регионального водоупора, мощности четвертичных отложений, гидрогеологических профилей по характерным направлениям.

В зависимости от особенностей геологического строения в некоторых районах региональный водоупорный горизонт четвертичного возраста отсутствует. В этом случае берутся дочетвертичные отложения, обладающие водоупорными свойствами и подстилающие горизонт грунтовых вод.

Боковая граница на геологической карте определяется по контакту четвертичных образований с выходами коренных пород мезозойско-кайнозойского или палеозойского возраста и др.

Верхняя граница — поверхность земли. Обоснование границ балансового региона производится на картографическом материале. Контурная граница балансового слоя (Алимов, 1971) выбирается в зависимости от целевого назначения балансовых исследований.

1. Для общего водного баланса она проводится на основании геоструктурного признака (для межгорных впадин по гребню водораздела).

2. По геоморфолого-литологическому признаку соответствует линии выхода коренных пород, т. е. началу формирования четвертичных осадков.

3. На основании литологического признака границу намечают по зоне формирования покровных суглинков или погружения подстилающих песчано-галечниковых отложений.

4. Границы балансового слоя по гидрогеологическому признаку проводятся по линии начала зоны неглубокого залегания или зоны проявления вертикального водообмена грунтовых вод.

5. Контурная граница проводится по линиям возможного построения гидрогеологических профилей, позволяющим определить подземный приток в балансовый район.

Выбор и обоснование расчетного периода

Водный баланс составляется для среднемноголетнего периода, длительность которого устанавливается на основании анализа графиков многолетнего режима подземных вод. При выборе расчетного периода следует использовать закономерность уровенного режима грунтовых вод, выражающуюся в одиннадцатилетней цикличности.

За одиннадцатилетний период наблюдений необходимо собрать данные по элементам водного баланса и определить среднемноголетние величины (норму) каждого.

При отсутствии фактических данных за продолжительный период наблюдений балансовые расчеты можно производить по материалам одного года, среднего по водности, что устанавливается анализом режимных графиков по атмосферным осадкам, поверхностному стоку и уровенному режиму грунтовых вод.

Среднемноголетний период определяется на основании изученности территории и наличия фактического материала по годам исследований. Выбираются года, за которые накоплено наибольшее количество данных по элементам баланса.

При выборе среднемноголетнего периода используется также цикличность уровенного режима и основных режимообразующих факторов. Для большинства орошаемых массивов закономерности цикличности уровенного режима грунтовых вод и связь их с солнечной активностью не изучены, что также объясняется отсутствием многолетних данных. Поэтому при установлении среднемноголетнего балансового периода в основном руководствуются наличием необходимых количественных показателей по элементам баланса и характерностью выбранного периода с точки зрения водности. За среднемноголетний период расчетным является один календарный год.

Однолетний период используется для ориентировочной оценки формирования баланса грунтовых вод. По некоторым орошаемым территориям среднемноголетние величины элементов баланса определить невозможно из-за краткости периода наблюдений или недостаточной изученности территории. В этом случае

на основе анализа многолетнего режима атмосферных осадков (интегральные кривые режима осадков) устанавливается характерный по водности год.

Выбор и обоснование расчетной схемы

Баланс грунтовых вод орошаемых территорий формируется под влиянием естественных и искусственных факторов, определяющих в условиях орошаемого земледелия. Ирригация, орошение, промывка — основные источники пополнения запасов грунтовых вод. Ввиду низкой водопроницаемости пород зоны аэрации питание за счет атмосферных осадков минимальное.

Грунтовые воды предгорных равнин, межгорных впадин, где применяется орошение, частично подпитываются из глубоких напорных водоносных горизонтов. Основную часть расхода баланса составляет испарение грунтовых вод при относительно небольших величинах дренажного и подземного стока. Таким образом, приходная статья баланса состоит из подземного притока (W_1), инфильтрационного питания ($И_ф$), глубинного подземного подпитывания из коренных отложений (I_1). Расходная часть — из подземного оттока (W_2), дренажного стока (Y_g), испарения грунтовых вод (Z).

Расчетная схема баланса грунтовых вод имеет следующий вид:

$$\mu_{\Delta h} = [W_1 + U_ф + I_1] - [W_2 + Y_g + Z], \qquad (6)$$

где

μ — удельная водоотдача или недостаток насыщения;

Δh — разность уровней грунтовых вод в начале и конце расчетного периода;

W_1 — подземный приток с горного обрамления по контакту коренных пород с молодыми образованиями (W_1^k) и приток по аллювию речных долин (W_1^p);

$U_ф$ — инфильтрационное питание грунтовых вод, разделяющееся на следующие составляющие;

$U_ф^1$ — за счет атмосферных осадков;

$U_ф^2$ — инфильтрационных потерь в естественных водах;

$U_ф^3$ — потерь в искусственных водотоках;

$U_ф^4$ — потерь на полях орошения,

$U_ф^5$ — потерь из водохранилищ;

I_1 — глубинное подземное подпитывание;

W_2 — подземный отток, состоящий из фронтального и локального;

$W_2^ф$ — фронтальный отток — аналог регионального подземного стока;

W_2^a — локальный отток по аллювию речных или временных

водотоков, где водоносный горизонт характеризуется сравнительно высоким коэффициентом фильтрации;

Y_g — дренажный сток;

Z — испарение.

В межгорных впадинах и предгорных равнинах вследствие литологической смены фаций и четвертичных отложений грубообломочный материал постепенно переходит в мелкоземистый. Обычно верхняя часть первого от поверхности водоносного горизонта слагается мелкоземистым материалом. Литологическая смена мелкоземом характерна для областей разгрузки естественных потоков грунтовых и субнапорных вод; иногда гравийно-галечниковый материал замещается супесчано-суглинистым уже в зоне транзита. Поэтому в гидрогеологических бассейнах формирования потоков можно выделить два балансовых слоя: первый — в покровных мелкоземистых отложениях со свободным зеркалом грунтовых вод; второй — комплекс различных по механическому составу горизонтов, распространенных ниже покровных мелкоземов дорегионального водоупора. Здесь распространены субнапорные грунтовые воды (местный напор), напорность которых не связана с областью питания подземных вод и возникает в результате смены фаций и фильтрационных свойств (по горизонтали) водоносного горизонта, а также специфичного напластования различных по литологическому составу отложений.

Горизонт субнапорных вод непосредственно не связан с естественными и искусственными факторами формирования баланса (на площади распространения). Эта связь осуществляется через горизонт грунтовых вод мелкоземистого покрова.

Приходная статья водного баланса субнапорных вод складывается из горизонтального притока из областей питания и вертикального подпитывания из напорных водоносных горизонтов дочетвертичного возраста. Расходная статья — из горизонтального подземного оттока в зону рассеивания потоков и вертикального.

Обычно режим грунтовых вод отражает внешнюю сторону процесса, форму изменения во времени, качества и количества грунтовых вод. Баланс — количественное выражение факторов, вызывающих изменение запасов воды и солей в определенный отрезок времени.

Под общим определением баланса грунтовых вод следует понимать соотношение между их приходными и расходными частями, образующееся в любой период времени по сравнению с принятым начальным моментом и характеризующее отток воды из водоносного горизонта или приток в него.

Если говорить о балансе подземных вод и зоны аэрации, то соответственно следует уточнить, что в первом случае речь идет об указанных соотношениях воды или солей в водонасыщенной части горизонта; во втором — о притоке или оттоке влаги и солей в ненасыщенной части водоносного горизонта между поверхностью земли и грунтовыми водами.

ГЛАВА 11

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ИСПАРЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

В хлопковой зоне СССР, включающей территории Азербайджанской, Узбекской, Таджикской, Киргизской, Туркменской республик и Южного Казахстана, испарение грунтовых вод исследуется с 1932 г. Систематически изучается в Узбекистане, Таджикистане, Киргизии — с 1961 г., Туркмении — с 1962 г., Южном Казахстане — с 1964 г., Азербайджане — с 1965 г.

За многолетний период лизиметрическими наблюдениями охвачены следующие регионы: Муганская и Ширванская степи, Ферганская, Чирчик-Ангренская долины, Голодная степь, Бухарский, Каракульский, Хорезмский, Ташаузский оазисы, Шерабадская, Каршинская степи, Каракалпакия, долины рек Зеравшана, Чу, Вахша, Кзылсу-Яхсу, дельта р. Мургаба, а также Туркестанский орошаемый массив. В Муюнкумах и Кызылкумах испарение изучалось под влиянием естественного растительного покрова. В орошаемых оазисах в лизиметрах экспериментально определялось под хлопчатником, люцерной, естественной растительностью, кукурузой, рисом, свеклой, бахчевыми культурами.

В хлопковой зоне в разное время с различным периодом существования функционировали 23 опытно-балансовых участка, 37 лизиметрических площадок, организованных гидрогеологическими станциями и партиями МГ СССР (рис. 2).

Опытно-балансовые участки слагают грунты различного литологического строения, начиная от эоловых, пылеватых песков до глинистых отложений.

Наиболее полный ряд стационарных лизиметрических наблюдений по состоянию на январь 1972 г. имеется по Маликскому участку — 14 лет, Курган-Тюбинскому — 13, Приташкентскому — 12, по остальным не превышает 10 лет. Количество исправно функционировавших в течение одного года лизиметрических установок составляет 692 шт., в которых моделировалась глубина залегания грунтовых вод от 0,5 до 4,5 *м*.

В основном испытывались грунты естественной структуры, лишь в некоторых случаях, особенно в начале исследований, установки заряжались насыпными грунтами.

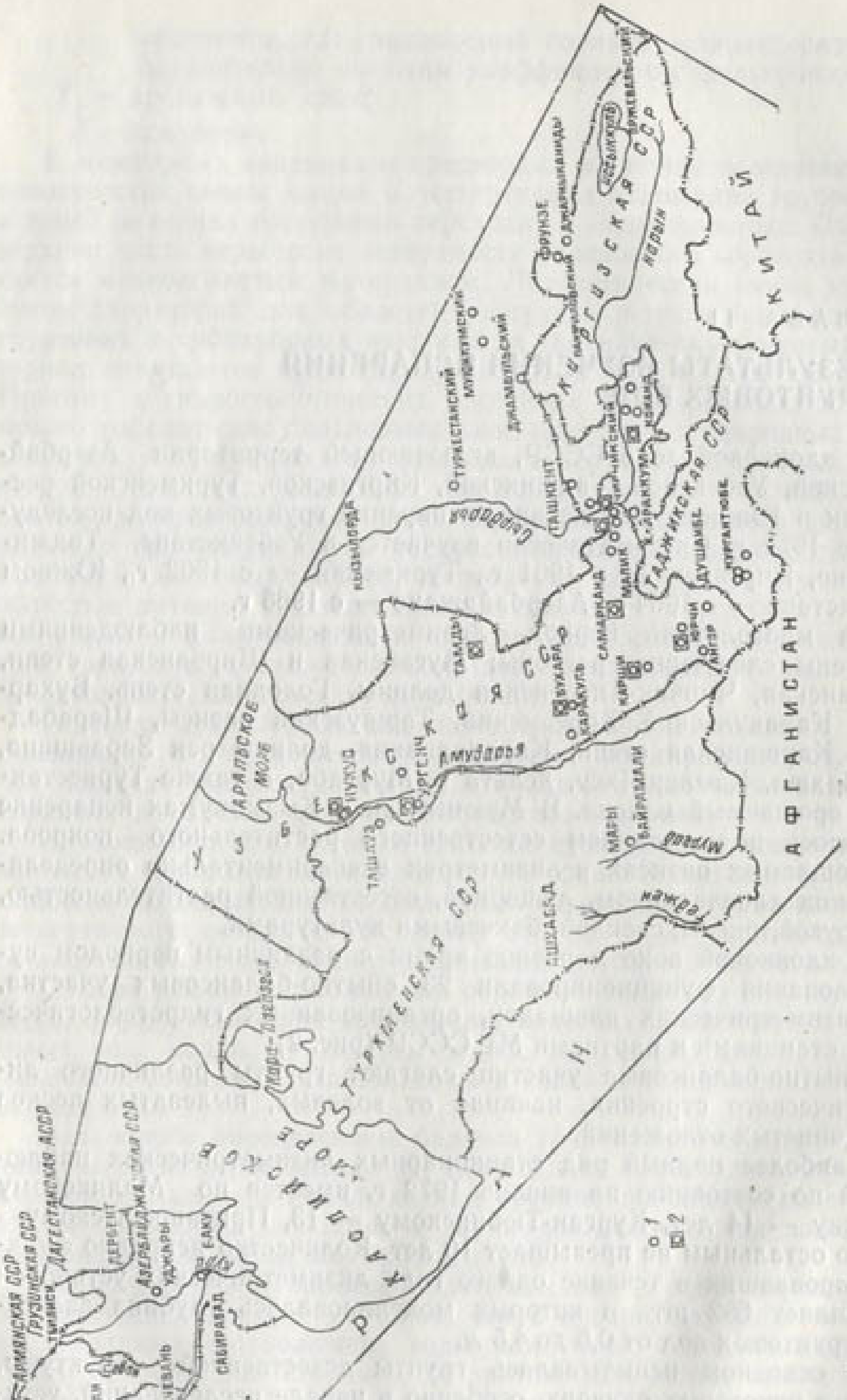


Рис. 2. Схема расположения лизиметрических площадок гидрогеологических станций Мингео СССР (1976 г.):
1 — существовавшие ранее и функционирующие; 2 — закрытые в 1972 г.

Более чем за сорокалетний период лизиметрических наблюдений основной комплекс работ был проведен на орошаемых землях с целью количественной оценки испарения под влиянием орошения и вне хозяйственной деятельности человека. Фактический материал в различных природных и водохозяйственных условиях, с разными конструкциями приборов, способами замеров, обработкой почв, фенологическими наблюдениями имеет неоднородный характер, большинство экспериментальных исследований в лизиметрах не завершено.

ЧИРЧИК-АНГРЕНСКИЙ БАССЕЙН

Систематические стационарные исследования начались в 1951 г. с организацией опытно-балансового участка на второй террасе р. Чирчика под руководством В. В. Руленко. Опытный участок площадью 1,5 $км^2$ сложен рыхлыми галечниками (мощностью более 50 *м*), с поверхности прикрытыми слоем мелкозема (мощностью от 0,5 до 3,3 *м*), на лизиметрической площадке — 1,2 *м*.

В 1960 г. организовано широкое изучение испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в лизиметрах с хлопчатником. Приборы заряжались грунтом ненарушенной структуры, повторность опытов двукратная, уровень грунтовых вод моделировался в пределах 0,5—2,0 *м* от поверхности земли.

С 1961 г. в Чирчик-Ангренском бассейне лизиметрические наблюдения продолжила Голодностепская гидрогеологическая станция[1]. Дополнительно установлены приборы приемной площадью 0,1 $м^2$, различной глубиной залегания грунтовых вод, с оголенной поверхностью, хлопчатником, люцерной и естественной растительностью. Всего 32 лизиметра.

В 1965 г. на опытно-балансовом участке испарение изучалось по следующим группам лизиметров: первая — с поверхностью почвы и транспирацией хлопчатником, вторая — люцерной, третья — естественной растительностью, четвертая — поверхностью почвы без растительного покрова. Каждая состояла из восьми лизиметров. Испытывались установки с естественной и насыпной структурами грунта, различной глубиной залегания грунтовых вод.

С 1967 г. для изучения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод применялись лизиметры площадью 1,44 $м^2$. В 1972 г. экспериментальные исследования в Чирчик-Ангренском бассейне были прекращены. В процессе исследований испарения в Чирчик-Ангренском бассейне можно выделить два этапа. Первый — поиски лучших вариантов исследований, конструкций приборов, путей повышения точности измерений и способов ав-

[1] Ташкентская станция была закрыта, поэтому Чирчик-Ангренский бассейн входил в объект исследования Голодностепской гидрогеологической станции.

томатизированных замеров и наблюдений на лизиметрических площадках, репрезентативных участках и т. д. Второй можно назвать периодом с установившимися методами исследований, поисков зависимостей и режима испарения, взаимосвязи его с водохозяйственной деятельностью человека.

Мы считаем, что в Чирчик-Ангренском бассейне, хотя и пройдены оба этапа экспериментальных исследований, но не полностью. Условия опытно-балансового участка (двухслойное строение — маломощный слой мелкозема, подстилаемый галечниками) характерны только для II террасы р. Чирчика, а не для всего бассейна рек Чирчика — Ангрена.

Более или менее достоверную характеристику испарения в целом по бассейну можно получить при организации дополнительной сети лизиметрических площадок в разных геоморфолого-литологических и гидрогеолого-мелиоративных условиях. Относительно второго этапа исследований можно отметить, что закономерности испарения и режим его по сезонам года остались неизученными из-за неясности зависимости испарения от поливных норм, литологического состава грунтов от оптимальной площади лизиметров. И наконец, из-за отсутствия результатов по влажности зоны аэрации, синхронных по срокам замера испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод, в настоящее время затруднительна возможность перехода от данных лизиметров к естественному испарению с дневной поверхности. Второму этапу исследований присущ недостаток, связанный с неизученностью связи испарения с минерализацией грунтовых вод, видами сельхозкультур, мощностью зоны аэрации. Речь идет о неопределенности критической глубины испарения. Существующее мнение по этим вопросам нуждается в уточнении, так как не подтверждается на практике.

Специфика строения зоны аэрации состояла в том, что верхняя часть испытуемого грунта в лизиметрах имела естественную структуру, а нижняя насыпалась из галечников в интервале 1,2—3,0 *м*, т. е. в экспериментах выдерживались условия строения зоны аэрации опытно-балансового участка.

Зависимость испарения грунтовых вод от глубины их залегания в лизиметрах с оголенной почвой, по данным многолетних наблюдений, приведена на рис. 3. Испарение за год при глубине 0,5 *м* составило в среднем 670 *мм*, 1,0—460; 1,5—270; 2,0 *м*—65 *мм*.

В соответствии с литологическим строением зоны аэрации, чередованием суглинков и галечников уменьшение интенсивности испарения в интервале глубин 0,5—1,0 *м* составляет 36,4%; 1,0—1,5 *м*—41,3%. При горизонте грунтовых вод в галечниках снижение испарения выражено более интенсивно и в интервале глубин 1,5—2,0 *м*, т. е. у подошвы покровных суглинков, составляет 75,0%, что связано с низким капиллярным свойством галечников.

Интенсивность испарения грунтовых вод при глубине 0,5 *м* изменяется: от 510 до 958 *мм*, при 1,0 *м* — от 320 до 710 *мм*, при 1,5 *м* — от 245 до 280 *мм*, при 2,0 *м* — от 30 до 120 *мм*.

Если рассматривать сезонный ход испарения, можно отметить, что максимальная величина наблюдается в августе и составляет 144 *мм* при глубине 0,5 *м*, при — 1,0; 1,5 *м*, 2,0 *м* соответственно 5,2; 7,2; 7,0 *мм*. Минимум испарения отмечен в декабре и не превышает 10 *мм*.

В лизиметрах с естественным растительным покровом кривая зависимости испарения показана на рис. 3. Испарение с уменьшением глубины залегания грунтовых вод увеличивается. Так, при глубине 0,5 *м* оно в среднем составляет 839 *мм/год* (542—

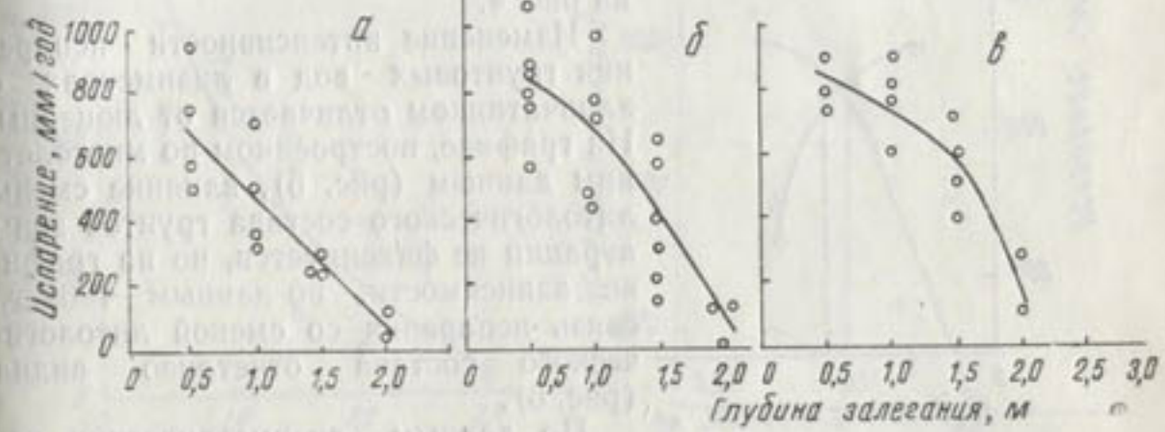


Рис. 3. Зависимость сезонного испарения грунтовых вод от глубины залегания в условиях различного деятельного покрова:

а — оголенная почвенная поверхность, *б* — естественная растительность, *в* — люцерна первого года посева.

1063 *мм*), при 1,0—692 (443—990 *мм*), при 1,5—400 (158—640 *мм*), при 2,0 — 94 *мм/год* (15—110 *мм*).

Из сравнения (рис. 4) можно заметить относительно резкое падение интенсивности с 839 до 400 *мм/год* что, по нашему мнению, связано с литологическим строением зоны аэрации и различием капиллярных свойств суглинков и галечников, слагающих испытуемые грунты. Точка изгиба на кривой (рис. 4) хорошо согласуется с глубиной залегания подстилающих галечников, где проходит граница между различными грунтами (рис. 4). На графике зависимости испарения в аналогичных условиях за 1963 г. (рис. 4) вертикальной пунктирной линией показана граница раздела между грунтами с различным литологическим строением, глубиной залегания кровли галечников от поверхности земли. Кривая имеет более выпуклую форму, что объясняется относительно высокой среднегодовой температурой воздуха по сравнению с нормой и более развитой зеленой массой растений.

На рис. 3 представлен график зависимости испарения грунтовых вод в лизиметрах с люцерной первого года посева. Среднее

испарение за многолетний период при глубине залегания грунтовых вод на 0,5 *м* от поверхности земли составляет 846 *мм/год* (740—910 *мм*), при 1,0—720 (640—900 *мм*), при 1,5—590 (400—725 *мм*), при 2,0—190 *мм/год* (115—293 *мм*).

Если принять испарение на глубине 0,5 *м* за 100%, при 1,0 она составит 85%, при 1,5 — 69,6%, при 2,0 *м* — 23,6%.

Необходимо отметить, что точка изгиба, ниже которой интенсивность испарения резко уменьшается в связи с переходом к другой литологической разности грунта, сдвинута на 0,45 *м* ниже, что связано с особенностями физиологического развития люцерны первого года и корневой системы. В общем виде кривая зависимости испарения в лизиметрах с люцерной первого года аналогична приведенной на рис. 4.

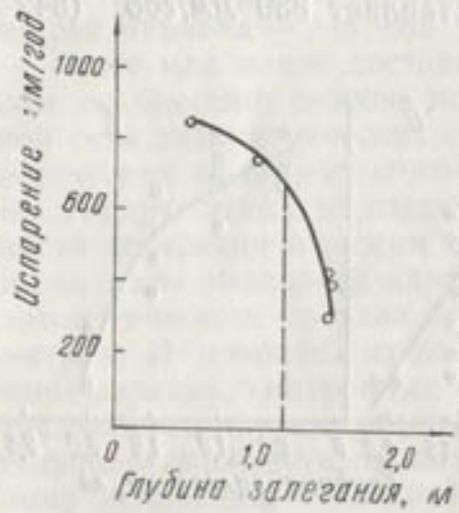


Рис. 4. Зависимость испарения грунтовых вод от глубины залегания в лизиметрах с двухслойным грунтом (1963 г.)

Изменение интенсивности испарения грунтовых вод в лизиметрах с хлопчатником отличается от люцерны. На графике, построенном по многолетним данным (рис. 5), влияние смены литологического состава грунтов зоны аэрации не фиксируется, но на графике зависимости, по данным 1962 г., связь испарения со сменой литологического состава отчетливо видна (рис. 6).

По данным лизиметрических наблюдений, за 1962 г. на опытно-балансовом участке «Пятилетие Узбекистана» снижение годового испарения, начиная с глубины 1,2, резко усиливается, что объясняется сменой литологического состава пород.

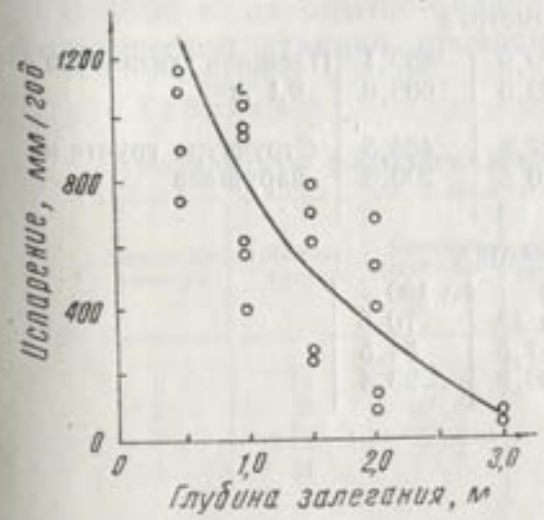
По данным за 1951—1971 гг., испарение в лизиметрах с хлопчатником при глубине залегания уровня грунтовых вод 0,5 *м* в среднем составляет 1290 *мм/год* (650—1860 *мм*), 1,0—820 (400—1100), 1,5—540 (240—790), 2,0—330 (80—680), 3,0 *м* — 60 *мм/год* (55—70).

Максимальное испарение грунтовых вод 1290 *мм/год* наблюдается при мощности зоны аэрации 0,5 *м*; с увеличением глубины залегания при мощности зоны аэрации 1,0, 2,0, 3,0 *м* соответственно уменьшается до 63,6, 41,8, 25,6.

Особенности испарения грунтовых вод в лизиметрах с различным покровом деятельной поверхности можно охарактеризовать данными наблюдений за 1961 г. Минимальное испарение наблюдается в лизиметрах с оголенной почвенной поверхностью, так как транспирация растительным покровом отсутствует. Максимальное — в лизиметрах с люцерной из-за ее больших транспирационных способностей. В лизиметрах с естественной растительностью (разнотравье) и хлопчатником получены промежуточные данные между результатами с оголенной почвой и люцерной (табл. 6).

Из приведенных материалов ясно видна тесная зависимость испарения грунтовых вод от глубины их залегания. Если принять испарение грунтовых вод за 100% при глубине залегания 0,5 *м* от поверхности земли, то величина годового испарения при глубине 1,0 *м* составит 61,2%, при 1,5—46,4, при 2,0 *м* — 23,1% (табл. 6).

Со снижением уровня грунтовых вод (в данном случае с 0,5 *м*) на каждые 0,5 *м* величина испарения уменьшается в среднем на 20—50% (табл. 6).



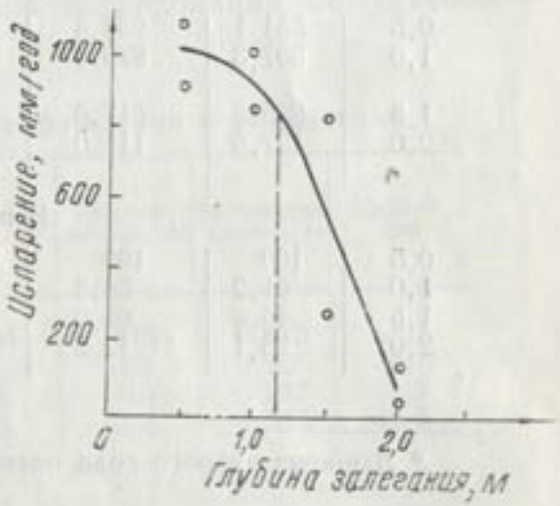


Рис. 5. Зависимость среднемноголетнего испарения грунтовых вод от глубины залегания.

Рис. 6. Зависимость испарения грунтовых вод от глубины залегания, по данным за 1962 г.

Необходимо отметить, что зависимость испарения грунтовых вод от глубины их залегания различная и зависит не только от литологического строения грунта, но и вида сельхозкультур.

На режим испарения грунтовых вод по сезонам года влияют метеорологические условия, интенсивность водоподачи, дренированность территории (табл. 7). Относительно резкое возрастание испарения грунтовых вод за август (217,8) объясняется прекращением поливов.

Испарение грунтовых вод тесно связано с распределением температуры в зоне аэрации. Максимум совпадает с высокими значениями температуры почвы в слое динамики зеркала грунтовых вод. В лизиметрах с глубиной залегания 1,0 и 1,5 *м* максимум испарения фиксируется в августе (217,8 и 153,0 *мм*), при 2,0 и 3,0 *м* он сдвинут на сентябрь и октябрь соответственно. Если проследить за прогревом почвы зоны аэрации под влиянием солнечной радиации, то можно отметить, что максимальная темпера-

тура почвы на глубине 0,4 *м* земли отмечается в конце июля, а 0,8 *м* — в середине августа, 1,6 *м* — в начале сентября. Запаздывание в повышении температуры почвы на глубине 1,0 *м* составляет 15—20 суток.

Таблица 6

Испарение грунтовых вод в лизиметрах с различной глубиной залегания грунтовых вод и покровом деятельной поверхности, за 1961 г.

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Оголенная почва	Естественный покров (разнотравье)	Люцерна второго года посева	Хлопчатник	Примечание
		В миллиметрах			
0,5	551,1	934,8	979,9	859,1	Площадь лизиметра 0,1 *м*²
1,0	337,3	829,8	1032,5	606,8	
1,5	255,8	617,0	857,8	468,5	Структура грунта не нарушена
2,0	127,6	114,0	390,5	200,8	
		В процентах			
0,5	100	100	100	100	
1,0	61,2	88,8	100,4*	70,6	
1,5	46,4	66,0	87,6	54,5	
2,0	23,1	12,2	39,8	23,4	

* Люцерна второго года посева.

Таблица 7

Количественная характеристика режима испарения грунтовых вод по данным лизиметрических наблюдений за 1966 г. в Чирчик-Ангренском бассейне (хлопчатник, площадь лизиметра—1,0 *м*², грунт ненарушенной структуры)

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Месяцы												Сумма за год	Урожайность, *ц/га*
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	IX	XII		
1,0	7,8	6,6	0,3	6,4	10,6	6,8	23,2	217,8	66,3	27,3	19,2	10,5	402,8	51,5
1,5	0,9	—	0,4	0,2	6,1	5,8	25,0	153,0	42,6	18,8	7,5	9,3	269,6	39,6
2,0	1,8	0,1	5,2	9,7	2,8	0,6	7,5	7,8	12,6	11,0	8,0	6,5	83,6	—
3,0	0,4	0,7	4,9	7,4	2,0	2,0	5,0	4,6	9,1	19,3	3,1	4,5	63,0	

В 1966 г. на лизиметрической площадке Ташкентской гидрогеологической станции изучение испарения и транспирации хлопчатником сопровождалось фенологическими наблюдениями, связанными с изучением состояния и развития растений в лизиметрах (табл. 8).

Испарение и транспирация в лизиметрах происходят в основном за вегетационный период (апрель — сентябрь). Так, по данным лизиметра № 1, испарение при общей величине за год 402,8 *мм* в период вегетации составляет 322,0 *мм;* по лизиметру № 2 соответственно 269,5 и 231,5 *мм;* по лизиметру № 3 — 83,5 и 49,5 *мм;* по лизиметру № 4 — 59,7 и 20,8 *мм;* глубина залегания грунтовых вод — 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 *м* от поверхности земли. Испарение за вегетационный период в среднем составляет 69,2% от испарения за год.

В 1966 г. на опытно-балансовом участке Ташкентской гидрогеологической станции проводились исследования по установлению влияния площади лизиметра на интенсивность испарения грунтовых вод. Так, при глубине залегания уровня грунтовых вод 1,5 *м*, ниже от поверхности земли испарение составило: по лизиметру с площадью 0,1 *м*²—337,0 *мм/год*, 1,0 *м*²—269,6 *мм/год*. Приведенные цифры, по нашему мнению, предварительные и претендовать на большую точность не могут, так как последующие эксперименты по проверке достоверности найденной зависимости не проводились.

Таблица 8

Результаты фенологических наблюдений в лизиметрах

Номер лизиметра	Кол-во кустов	Средняя высота куста, *см*	Кол-во веток, шт	Кол-во листьев, шт	Вес урожая хлопка, *кг*	Урожай *ц/га*
1	11	82,4	131	618	0,515	51,5
2	7	97,6	75	421	0,396	39,6
3	11	72,4	95	501	0,317	31,7
4	11	77,7	76	438	0,313	31,3

ГОЛОДНАЯ СТЕПЬ

Исследование испарения грунтовых вод на территории Голодной степи можно разделить на два периода. Первый — с 1953 г. по 1959 г., когда изучение элементов водно-солевого баланса осуществляется на временных экспериментальных площадках, созданных в Шурузякском понижении вблизи ж-д станции Велико-Алексеевская (1953—1958) и в Сардобинском понижении на территории с-за «Мирзачуль» в 18 *км* юго-западнее г. Гулистана (1958—1959).

Во второй период — с 1960 по 1971 г. испарение грунтовых вод изучалось на опорной опытно-экспериментальной площадке «Малик», расположенной в Шурузякском понижении в 10,0 *км*

юго-западнее г. Сырдарья. Здесь в комплексе исследовались испарение и транспирация грунтовых вод на старорошаемых землях под методическим руководством М. М. Крылова, А. Ф. Сляднева и при участии М. С. Алимова.

В соответствии с перспективным планом за десять лет наблюдений детально изучены закономерности испарения лизиметрическим методом и теплового баланса. Первым определялось испарение грунтовых вод, а вторым — с почвенной поверхности. Эксперименты проводились по серии лизиметров, общее количество которых превышает 100 шт. только на опытно-балансовом участке «Малик». Испытывались приборы площадью от 0,1 до до 5,2 $м^2$, с естественной растительностью и техническими культурами; моделировались различные глубины залегания грунтовых вод в пределах 0,1—3,0 *м* от поверхности земли.

Детально изучалось распределение тепла в почве по сезонам года и под разной деятельной поверхностью, что сопровождалось комплексом теплобалансовых и необходимых градиентных наблюдений.

За многолетний период испарение грунтовых вод изучалось по лизиметрам с нарушенной и естественной структурой испытуемых грунтов, с поверхности оголенной почвы, естественным растительным покровом, люцерной, хлопчатником. В лизиметрах — с суглинком, естественной структурой, с покровом хлопчатника.

Испарение грунтовых вод при глубине залегания от поверхности земли 1,0 *м* составляет в среднем 435 *мм/год*, 1,5—300, 2,0—198, 3,0—90 *мм год*. При интерполяции кривой для глубины залегания грунтовых вод 0,5 *м* от поверхности земли можно получить среднее испарение грунтовых вод 590 *мм/год*. Анализ зависимости позволяет утверждать, что существующее мнение о прекращении испарения в лизиметрах с хлопчатником ниже 3,0 *м* преждевременное. Результаты многолетних экспериментальных работ свидетельствуют о существенном испарении грунтовых вод при глубине залегания 3,0 *м*, которое по среднемноголетним данным составляет 30% от нормы атмосферных осадков, что значительно превышает точность расчета. Если испарение грунтовых вод при глубине залегания 0,5 *м* (590 *мм*) принять за 100%, то при 1,0 *м* оно составит 73,8%; 1,5—50,8; 2,0—31,9, 3,0 *м* — 15,3%.

В результате многолетних исследований на опытно-балансовом участке «Малик» критическая глубина испарения для отмеченных условий не установлена, следовательно, в дальнейшем необходимо продолжить исследования вод с применением более глубоких лизиметров с высотой монолита 3,5 и 4,0 *м* и выше.

Рассмотрим зависимость испарения грунтовых вод в лизиметрах с насыпным грунтом и хлопчатником. Среднемноголетняя величина испарения грунтовых вод в данных условиях существенно не отличается от лизиметров с монолитом, но имеются некоторые различия. Если при глубине 2,5 и 3,0 *м* абсолютные значения по разным лизиметрам совпадают, то в интервалах глубин

1,5—2,0 *м* показания лизиметров с монолитом меньше, чем в насыпных. Разность в показаниях растет с приближением уровня грунтовых вод к поверхности земли. Иными словами, при близком залегании грунтовых вод испарение в лизиметрах с насыпным грунтом больше, чем с монолитным.

Зависимость испарения грунтовых вод в лизиметрах с люцерной первого года посева в общем виде аналогична зависимости, полученной в приборах с хлопчатником. Разница лишь в том, что испарение в первых больше, чем во вторых. Испарение грунтовых вод на глубине 0,5 *м* в среднем составляет 1200 *мм/год*, при 3,0 уменьшается до 118 *мм/год*, что составляет 9,8% от максимального.

По результатам многолетних исследований испарения в лизиметрах с насыпным грунтом при прочих равных условиях ход

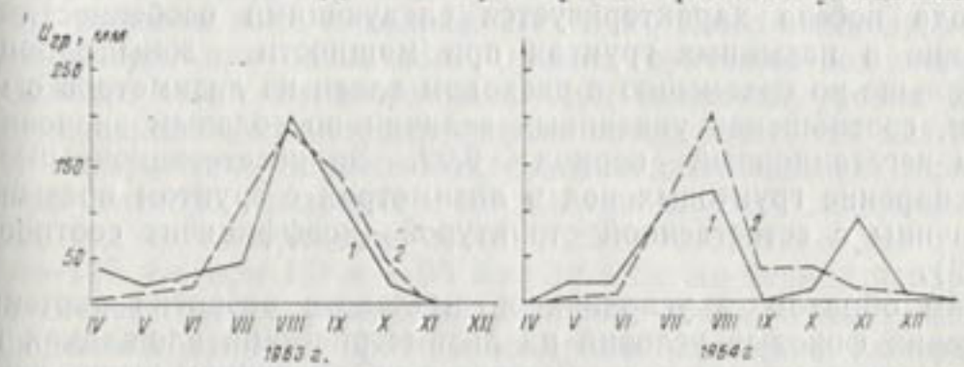


Рис. 7. Совмещенный график режима сезонного испарения грунтовых вод в лизиметрах с монолитными (*1*) и насыпными грунтами с хлопчатником (*2*).

кривой зависимости аналогичен предыдущему. Разница в том, что в лизиметрах с насыпными грунтами испарение при глубине залегания грунтовых вод выше 2,2 *м* больше, чем с монолитом, а ниже 2,2 *м* — меньше, что, видимо, связано с особенностями развития корневой системы люцерны первого года посева и процессом восстановления структуры грунта.

На рис. 7 приведен совмещенный график режима испарения грунтовых вод в лизиметрах с монолитным и насыпным грунтом по месячной величине испарения. Для сравнения взяты данные при мощности зоны аэрации 1,0 *м*, площади — 1,0 $м^2$, с хлопчатником.

Из анализа можно установить, что в первый год эксплуатации лизиметров соотношение величин испарения равно 1,04. Во втором, третьем и последующих годах испарение в нарушенных грунтах больше и соотношение годовых величин составляет 0,87; 0,73—0,90 за вегетационный период, среднемноголетние значения — 0,92.

Влияние структуры грунта с увеличением мощности зоны аэрации ослабевает, соотношение величин испарения по годовым величинам составляет 0,99, за вегетационный период в лизимет-

рах с монолитным грунтом наблюдаются некоторые превышения испарения и указанного соотношения (1,29). За невегетационный период испарение в условиях насыпных грунтов меньше и соотношение величин составляет 0,31.

При мощности зоны аэрации 2,0 *м* испарение грунтовых вод в условиях насыпных грунтов в период вегетации характеризуется меньшими значениями по сравнению с показателями в монолитных, а в невегетационный период фиксируется обратное соотношение, т. е. в монолитных грунтах испарение меньше, чем в условиях с насыпной почвой. Соотношение величин изменяется по годовым значениям — 1,0—3,0, за вегетационный период — 2,0—4,7, невегетационный — 0,5—1,4.

Зависимость интенсивности испарения грунтовых вод от структуры испытуемых грунтов в условиях произрастания люцерны первого года посева характеризуется следующими особенностями. Испарение в насыпных грунтах при мощности зоны аэрации 1,0 *м* больше по сравнению с расходом влаги из лизиметров с монолитом, соотношение указанных величин по годовым значениям 0,97, за вегетационный период — 0,92. За невегетационный период испарение грунтовых вод в лизиметрах с грунтом превышает величины с естественной структурой (коэффициент соотношения 1,22).

Таким образом, в условиях оптимального развития растений, соблюдения фоновых условий на лизиметрических площадках испарение грунтовых вод в лизиметрах с хлопчатником выше, чем с насыпным грунтом при небольшой мощности зоны аэрации (1,0 *м*) — 8% по среднемноголетним значениям, 13% — годовым, 17% — в период вегетации.

Соотношение величин испарения по месячным величинам испарения колеблется в широких пределах, что объясняется отставанием или опережением роста хлопчатника в лизиметрах, различием в условиях затенения почвенной поверхности в лизиметрах и водохозяйственными условиями.

В лизиметрах с естественным растительным покровом в условиях природной структуры грунтов зависимость испарения от глубины залегания по многолетним данным сходна с ходом кривой зависимости в случае с хлопчатником и люцерной первого года посева. Если с покровом люцерны при глубине залегания зеркала грунтовых вод 1,0 *м* оно составляет 543 *мм*, а с хлопчатником — 435 *мм*, то при естественном покрове равно 370 *мм*.

В условиях моделирования глубины на 1,5 *м* ниже поверхности земли соответственно получены следующие результаты: для люцерны первого года посева — 360 *мм*, хлопчатника — 300 *мм*, естественной растительности — 195 *мм*. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в лизиметрах с естественной растительностью испарение грунтовых вод меньше, чем с хлопчатником и люцерной первого года посева. Следует также отметить превышение испарения грунтовых вод в лизиметрах с насыпными грунтами на 40 *мм* по сравнению с монолитными в интервалах глубин залегания грунтовых вод 1,5—2,0 *м* от поверхности. За пределами указанной мощности зоны аэрации испарение в насыпных грунтах меньше, чем в лизиметрах с монолитом.

Результаты многолетних исследований испарения в лизиметрах с монолитом и оголенной почвенной поверхностью показали, что с глубиной абсолютная величина испарения снижается в среднем от 422 *мм/год* при 0,5 *м* до 80 *мм/год* (19,3%) при 2,0 *м* ниже поверхности земли. Величина испарения за год для глубины 0,5 *м* меняется от 380 до 435 *мм*; 1,0 *м* — 170—330 *мм*; 1,5 *м* — 87—162 *мм*; 2,0 *м* — 38—140 *мм*.

В Валдайской научно-исследовательской лаборатории в 1951—1958 гг. исследовалась зависимость испарения от глубины залегания грунтовых вод с различным покровом деятельной поверхности на паровом поле и целине. По А. Р. Константинову, испарение с целины при одинаковом уровне грунтовых вод значительно больше, чем с парового поля. При снижении уровня испарение уменьшается, причем для второго интенсивнее, чем для первой.

В испарителях, заряженных флювиогляциальными песками, с мая по сентябрь испарение с почвы при глубине залегания грунтовых вод от поверхности земли 0,25 *м* составило 268 *мм*, при 0,5 *м* — 117 *мм*, при 1,0 *м* — 95 *мм*. За этот же период испарение с луга соответственно было 620, 672, 603, 454 *мм*. Как видно из приведенных данных, при равномерном снижении испарения с увеличением мощности зоны аэрации на пару максимум испарения на лугу наблюдается при глубине залегания 0,5 *м* (672 *мм*), что связано с большим развитием корневых систем в испарителе.

А. В. Лебедев (1963) на Щемиловском опытно-балансовом участке ВСЕГИНГЕО получил данные, характеризующие уменьшение испарения грунтовых вод при снижении уровня. Так, при глубине залегания уровня в лизиметре 1,30 *м* испарение равно 158,9 *мм/год*, при 2,35 *м* — 35,4 *мм/год*.

Аналогичная зависимость установлена в Муганской степи Ф. Ш. Алиевым и А. А. Алирзаевым (1970). По их данным, испарение с хлопкового поля за вегетационный период при глубине 0,90 *м* составляет 470,8 *мм*; 1,90—230,6, 2,90—28,9 *мм*. По Ю. Г. Планину (1965), испарение с хлопкового поля в оазисах Таджикской ССР за вегетационный период при 1,0 *м* составляет 612,3 *мм*; 2,0—187,5; 3,0—31,0 *мм*.

В 1963 г. на опытно-балансовом участке «Малик» исследовалось влияние фазы развития люцерны в лизиметрах на интенсивность испарения грунтовых вод. Установлено десять лизиметров площадью 0,1 $м^2$, с естественной структурой грунтов и посевами люцерны первого года — 3, второго — 3 и третьего — 3. В каждой серии лизиметров опыты проводились при глубинах залегания грунтовых вод 1,0; 1,5; 2,0 *м* от поверхности земли (табл. 9).

При глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* (табл. 10) испарение для люцерны второго года составляет 1968,4 *мм/год*, для

Таблица 9

Испарение грунтовых вод в лизиметрах с люцерной, *мм*

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Месяцы												Сумма за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Первый год посева													
1,0	—	—	—	—	16,8	84,46	143,36	110,07	67,22	74,88	20,49	—	516,49
1,5	—	—	—	—	9,8	18,0	75,0	64,8	63,6	—	17,20	—	248,4
2,0	—	—	—	—	1,8	19,9	45,45	26,1	27,45	31,95	8,45	—	162,10
Второй год посева													
1,0	9,5	43,5	166,0	293,0	298,6	346,8	266,0	282,1	327,0	97,0	27,0	5,6	1968,4
1,5	4,8	28,0	144,4	219,2	396,2	534,6	375,8	447,3	228,8	159,2	33,8	1,6	2589,6
2,0	14,8	37,2	71,4	234,6	302,8	403,6	504,2	303,0	250,0	297,2	178,0	51,6	2651,9
Третий год посева													
1,0	20,0	13,2	39,7	108,5	293,5	275,0	136,6	75,59	57,7	107,1	21,1	24,5	1734,5
1,5	10,0	4,8	10,2	93,0	270,5	322,0	149,9	85,5	74,3	163,2	171,1	18,9	1424,5
2,0	16,8	18,8	36,2	101,5	263,5	210,3	229,18	181,9	129,58	281,2	173,0	121,8	1784,6

третьего — 1175,4 *мм*, а при глубине 1,5 *м* соответственно 2589,6—1423,4 *мм*; при глубине 2,0 *м* — 2651,9 — 1784,6 *мм*. Абсолютная величина испарения грунтовых вод люцерной третьего года посева меньше по сравнению с двухлетней растительностью.

Большое испарение грунтовых вод люцерной второго года посева по сравнению с трехлетней можно объяснить наибольшей зеленой массой и максимумом ростков люцерны от корня. В связи с давностью посева более двух лет уменьшаются сосущие способности растения вследствие затвердевания волосистых корней, а также уменьшения ростков зеленых стеблей от корня вследствие старения люцерны, так как посевы на третий год становятся реже, а в последующие годы урожайность снижается. Прямая зависимость испарения в лизиметрах с люцерной объясняется прямой пропорциональностью между массой корневой системы и мощностью зоны аэрации, т. е. с понижением уровня грунтовых вод пышно развивается корневая система.

Увеличение испарения люцерной при понижении уровня почвенных вод связано с биологической особенностью люцерны, приспособленностью к условиям засушливого климата. Площадь листьев люцерны в 4—5 раз больше, чем поверхность лизиметра (испарителя). Запас влаги грунтов зоны аэрации на люцерновом поле больше (от 4 до 38%), чем на хлопковом, хотя оросительная норма в 1,5—1,3 раза выше, микроклимат люцернового поля на 5—6° холоднее, чем на хлопковом за счет пониженного теплового баланса деятельной поверхности.

Таблица 10

Сравнительная характеристика испарения грунтовых вод люцерной разного возраста в Муганской степи (по А. А. Алирзаеву), *мм/год*

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Год посева		
	первый	второй	третий
1,0	—	891,0	585,6
1,5	610,4	1033,6	622,7
1,9	607,4	1270,3	806,7
2,4	243,7	924,5	724,4

Указанная зависимость испарения от длительности развития люцерны установлена по данным экспериментальных работ, проведенных в орошаемых районах Азербайджана, Таджикистана, Узбекистана (А. А. Алирзаев, Ю. Г. Планин, М. С. Алимов, табл. 10).

По А. А. Алирзаеву (1970), в лизиметрах, занятых люцерной второго года развития, нарушается закономерность, характерная для всех технических культур, в том числе и люцерны первого года, т. е. до глубины 1,90 *м* испарение грунтовых вод увеличивается, а глубже уменьшается, что связано с особенностью развития корневой системы люцерны.

За многолетний период 1958—1971 гг. в Голодной степи проводились наблюдения по более чем 140 лизиметрам, из них 54 шт. площадью 0,1 *м*², 16—0,36, 27—1,0, 21—1,44, 8—2,0, 6—3,24, 3 шт.,—5,20 *м*². Из общего количества с хлопчатником было более 60 шт., с люцерной — 34, естественной растительностью — 14, оголенной почвой — 13 шт. Около 30% всех лизиметрических установок ис-

пытывалось с грунтом нарушенной структуры. Глубина залегания грунтовых вод 0,5 *м* моделировалась в 11 лизиметрах; 1,0 *м* — 36; 1,5 *м* — 43, 2,0 *м* — 26; 3,0 *м* — 13.

М. С. Алимов (1971) пришел к выводу, что в условиях посева хлопчатника оптимальной площадью лизиметра является 1,44 $м^2$ (1,2×1,2). При этом он исходил, главным образом, из возможностей обработки растений при квадратно-гнездовом способе посева и агротехники.

М. И. Каплинский при определении оптимальной площади лизиметров основывается на технико-экономических показателях и возможностях установки приборов для изучения испарения. С нашей точки зрения, подобный подход к определению оптимальной площади несколько субъективен. Поиски оптимальной площади испарителей с водной поверхности основываются на закономерностях испарения в связи с увеличением или уменьшением испаряющей поверхности, т. е. изменении интенсивности испарения при увеличении или уменьшении площади испарителя.

По М. И. Будыко (1947, 1948, 1950) и А. Р. Константинову (1968, 1971) и др., при уменьшении площади испарителя водный и тепловой режим почвенного монолита заметно искажается, что приводит к более интенсивной возгонке пара из испытуемого грунта, и в конечном итоге — к зависимости испарения от деятельной поверхности и его размеров.

Зависимость испарения с водной поверхности от площади к настоящему времени достаточно изучена и за оптимальную большинство исследователей принимают 20 $м^2$.

Если представить кривую зависимости испарения с водной поверхности и определить его величину, соответствующую определенной площади, то около какой-то точки график будет горизонтальным, т. е. динамики интенсивности испарения вблизи точки 20 $м^2$ не будет наблюдаться и площадь следует принимать за оптимальную.

К настоящему времени оптимальная площадь почвенных испарителей и лизиметров изучена слабо, и считаем не безынтересным анализ количественных показателей испарения грунтовых вод в лизиметрах с различной площадью, полученных на опытно-балансовом участке «Малик» в условиях суглинистых грунтов.

Обработка данных позволяет сделать вывод о зависимости оптимальной площади от структуры грунтов, вида культур, глубины залегания вод.

При глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* интенсивность испарения с единицы площади в среднем для 0,1 $м^2$ составляет 350 *мм;* 0,5 — 250; 1,0 — 160, 1,5 — 120, 2,0 $м^2$ — 80 *мм*, т. е. с увеличением площади лизиметра она падает, но не стабилизируется, что необходимо для определения оптимальной площади испарителя.

В лизиметре с оголенной почвенной поверхностью и глубиной залегания грунтовых вод 1,5 *м* интенсивность испарения падает от 0,1 до 1,0 $м^2$, далее она не изменяется. Следовательно, площадь

лизиметров 1,0—2,0 $м^2$ — оптимальная для суглинков и глубины залегания грунтовых вод 1,5 *м*.

Таким образом, с увеличением глубины залегания грунтовых вод уменьшается оптимальная площадь лизиметров. Если при 1,5 *м* она изменяется в пределах 1,0—2,0 $м^2$, то при 2,0 *м* составляет 0,1—0,6 $м^2$. Значит, размер оптимальной площади испарителя обратно пропорционален глубине залегания грунтовых вод. Придерживаясь установленной зависимости, можно ориентировочно оценить оптимальную площадь испарителя в интервале 3,5—4,0 $м^2$ при глубине залегания грунтовых вод в лизиметрах 1,0 *м*.

Результаты, полученные при испытании лизиметров с насыпным грунтом и естественной растительностью показали, что за оптимальную площадь при глубине 2,0 *м* можно принять 1,2 $м^2$. В лизиметрах с насыпными грунтами площадью 1,0 и 1,5 $м^2$ испарение стабилизировалось, а в испарителях с монолитным грунтом при увеличении размеров испаряющей поверхности продолжает заметно снижаться.

При разной глубине грунтовых вод интенсивность испарения с увеличением площади испарителя снижается различно: при 1,0 *м* для площади 0,1 $м^2$ составляет 800 *мм;* 0,5—690; 2,0—350; 3,0—210; 4,0—180; 5,0 $м^2$—140 *мм* (разница в абсолютных величинах составляет 660 *мм/год*). При глубине залегания 1,5 *м* эта разница равна 330 *м* (0,1 $м^2$—400 *мм/год;* 5,0 $м^2$ — 70 *мм/год*). В лизиметрах с глубиной залегания грунтовых вод 2,0 *м* от поверхности земли испарение снижается менее интенсивно. Так, для площади 0,1 $м^2$ оно составляет 197 *мм/год;* 1,0—139; 2,0—90; 3,0—75, 4,0—70; 5,0 $м^2$ — 70 *мм*. Интенсивность испарения грунтовых вод при мощности зоны аэрации 2,5 *м* и площади испарителей 4 и 5 $м^2$ — одинакова, т. е. зависимость стабильная. Поэтому за оптимальную площадь лизиметра в условиях естественной структуры грунта с посевом хлопчатника при глубине залегания грунтовых 2,5 *м* можно принять 4,5 $м^2$.

Испарение в лизиметрах площадью 0,1 $м^2$ на глубине 3,0 *м* с суглинистыми грунтами за год в среднем составило 200 *мм;* 1,0 $м^2$— 65 *мм*, 2,0—42; 2,5—14; 3,0 $м^2$ — 0,0 *мм*.

В Голодной степи на опытно-балансовом участке «Малик» проведены экспериментальные работы по изучению зависимости испарения и транспирации люцерной грунтовых вод от площади лизиметров. Для этого выбрана серия испарителей площадью от 0,1 до 3,24 $м^2$. Результаты показали, что с увеличением площади лизиметров интенсивность испарения снижается (табл. 11).

Таким образом, в интервале изменения площади от 0,1 до 3,24 $м^2$ интенсивность испарения грунтовых вод уменьшается с увеличением площади лизиметра.

Отношение величин испарения грунтовых вод, полученных в испарителях площадью 0,1 и 3,24 $м^2$, изменяется от 3,61 до 9,50, что свидетельствует о значительном влиянии размеров поверхности на интенсивность.

Ввиду отсутствия экспериментов по количественному определению испарения грунтовых вод в лизиметрах площадью более 3,24 $м^2$ оценку оптимальной площади для лизиметров с люцерной первого года считаем невозможной.

Рассмотрим результаты обработки материалов с точки зрения месячных величин. Сезонные величины испарения так же, как годовые, показывают существенное влияние размеров испаряющей поверхности на интенсивность расхода грунтовых вод, тем ощутимее, чем меньше мощность зоны аэрации. Так, соотношение величин, полученных в лизиметрах площадью 0,36; 1,0 и 1,44 $м^2$ при глубине залегания 1,0 и 2,0 *м* составляет соответственно 10,9; 9,6; 8,0, что свидетельствует о значительном уменьшении испарения с глубиной и существенной его зависимости от площади прибора.

По данным наблюдений на опытно-балансовом участке «Малик» в 1966 г. наибольшие расхождения в величинах испарения наблю-

Таблица 11

Испарение грунтовых вод (*мм/год*) при разной площади лизиметров (суглинки естественной структуры, люцерна первого года посева)

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Площадь, $м^2$						* / **
	0,1	0,36	1,0	1,44	2,0	3,24	
1,0	940*	880	720	590	460	260**	3,61
2,0	300*	270	210	160	130	80**	3,75
3,0	190*	—	140	120	90	20**	9,50

даются в вегетационный период. Так, показания приборов площадью 0,36 $м^2$ (190,3 *мм*) в 2,1 раза больше, чем 1,44 $м^2$ (64,8 *мм*), за август—в 2,6 раза. В невегетационный период разница в показаниях приборов при значительно низких абсолютных величинах испарения составляет 2,3 (декабрь) — 4,4 (октябрь). С увеличением мощности зоны аэрации влияние площади на интенсивность испарения грунтовых вод сказывается в меньшей степени.

Таким образом, можно утверждать, что в вегетационный и невегетационный периоды от площади лизиметров зависит изменение испарения грунтовых вод, интенсивность уменьшается с глубиной.

Сезонный режим испарения грунтовых вод формируется как результат влияния метеорологических, водохозяйственных условий и агротехнических мероприятий на полях орошения. Для его характеристики приведем данные лизиметрических наблюдений при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* от поверхности земли с различным покровом деятельной поверхности в условиях естественной структуры грунта и площади лизиметра 0,1 $м^2$ (табл. 12).

Максимальное испарение грунтовых вод в лизиметрах с оголен-

Таблица 12.

Количественная характеристика режима испарения грунтовых вод по данным лизиметрических наблюдений в голодной степи, *мм*

	Месяцы												За год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Оголенная почва	—	9,0	10,0	4,8	29,0	44,3	49,4	37,8	33,2	29,5	10,8	5,2	265,0
Естественная растительность	4,0 10,2	15,3 4,6	13,1 23,7	20,14 10,2	40,50 89,0	86,00 81,2	98,00 150,4	64,00 134,3	36,5 80,1	14,0 43,4	2,50 10,0	3,8 11,1	398,8 648,2
Хлопчатник	—	—	—	—	16,8	84,5	143,4	110,1	67,2	74,9	20,5	16,2	533,6
Люцерна первого года посева	9,5	43,5	166,0	293,0	298,6	346,8	266,0	332,1	327,0	97,0	27,0	5,6	1968,4
Люцерна второго года посева	20,0	13,2	39,7	108,5	293,5	275,0	136,6	75,59	57,7	107,1	21,1	24,5	1173,5

Таблица 13

Сезонное распределение температуры воздуха, почвы, *град*

Температура	Месяцы												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Воздуха	—1,6	—0,6	6,5	17,5	21,0	26,2	26,8	25,8	21,6	13,2	4,5	—4,7	13,2
Поверхности почвы	—1,7	0,9	7,6	20,8	27,4	33,3	35,0	33,0	27,0	17,0	6,0	—4,0	17,0
Почвы на глубине: 0,2 *м*			7,5	18,1	25,1	30,5	32,3	31,5	27,4	18,6	8,6	2,2	20,1
2,0 *м*	11,3	10,5	10,1	10,5	14,6	17,4	19,9	21,4	22,2	20,9	18,1	14,7	16,1

ной почвой, естественной растительностью, хлопчатником и люцерной первого года посева наблюдается в июле в связи с высокими температурами воздуха и почвы в верхней части зоны аэрации (табл. 13), а с люцерной второго и третьего года посева, т. е. с более глубокой корневой системой, отмечены пониженные значения.

ФЕРГАНСКАЯ КОТЛОВИНА

Опытно-балансовые исследования в Центральной Фергане проводились с 1954 г. под руководством В. А. Гейнца. За период с 1954 по 1956 г. испарение грунтовых вод изучалось в Бувайдинском районе на суглинистых грунтах, в лизиметрах с постоянным уровнем, площадью 0,36 *м*², хлопчатником и люцерной. В 1957 г. лизиметрические исследования были сосредоточены на опытно-балансовом участке к-за «Коммунизм» в условиях образования зоны аэрации супесями и суглинками.

В 1958 г. испарение грунтовых вод изучается в условиях легких супесей на территории к-за «Орджоникидзе».

В 1959 г. проводятся опыты в лизиметрах площадью 0,1; 0,15; 0,42 *м*², устанавливаемых ниже пахотного слоя почвы.

В 1962 г. наблюдения осуществляются на Ахунбабаевском массиве в условиях плотных суглинков с применением лизиметров площадью 0,1 *м*².

С 1967 по 1971 г. экспериментальные исследования проводит Ферганская гидрогеологическая станция на опытно-балансовом участке «Буйрак», восточнее г. Коканда. Испарение изучалось в супесях и суглинках, использовались лизиметры площадью 1,44 *м*², с монолитом, покровом хлопчатника, люцерны. В приборах моделировалась постоянная глубина залегания грунтовых вод 0,5, 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 *м* от поверхности земли. Повторность опытов двухкратная. Изучение проводилось в комплексе с метеорологическими наблюдениями и определением испаряемости.

По результатам многолетних исследований в Ферганской котловине за 1954—1971 гг., получен фактический материал, на основе которого устанавливается зависимость испарения грунтовых вод от глубины их залегания, литологических разностей пород и сезонного режима.

В лизиметрах с плотным суглинком естественной структуры и оголенной почвенной поверхностью испарение грунтовых вод в среднем снижается от 310 *мм/год* на глубине 0,5 *м* от поверхности земли до 12,5 *мм/год* при 2,5 *м;* при 1,0; 1,5; 2,0 *м,* оно соответственно равно 105; 60; 32 *мм/год.*

Испарение грунтовых вод в условиях выращивания хлопчатника больше, чем с оголенной почвы. Испарение и транспирация хлопчатником при снижении уровня грунтовых вод до 0,5 *м* уменьшается в среднем от 1320 до 5,5 *мм/год* при 3,0 *м.* Испарение грунтовых вод в среднем составляет 700; 430; 230; 90 *мм/год* соответственно при глубине залегания 1,0; 1,5; 2,0: 2,5 *м.* Если принять

испарение при мощности зоны аэрации 0,5 *м* за 100% на глубине 3,0 *м* оно снижается до 0,4%.

В лизиметрах с люцерной первого года посева испарение грунтовых вод по сравнению с покровом хлопчатника в среднем больше на 300—400 *мм/год,* а в лизиметрах с люцерной при глубине 1,0 *м* составляет 1220 *мм/год;* 1,5—850; 2,0—620; 2,5 *м* — 470 *мм/год.* Необходимо отметить, что грунты в лизиметрах с хлопчатником и люцерной одинаковы по литологии и сохранности естественной структуры.

Большое испарение грунтовых вод под покровом люцерны, как отмечалось выше, связано с развитием корневой системы и, в некоторой степени, зеленой массы.

По данным лизиметрических исследований Ферганской гидрогеологической станции, проведенных в легких разностях супесей, в переслаивающихся супесях с суглинками и тяжелых суглинках, можно установить зависимость испарения грунтовых вод от механического состава грунтов, слагающих зону аэрации. Подобные обобщения в литературе отсутствуют. Несмотря на предварительный характер изучения зависимости испарения от литологических разностей в условиях Центральной Ферганы, считаем, что полученные цифры заслуживают внимания. Чем тяжелее механический состав грунтов, т. е. чем больше глинистых частиц в грунте, тем выше его капиллярные свойства. Так как одной из существенных причин подсоса влаги (кроме транспирации) растительностью к поверхности земли являются капиллярные поры, создающие кайму над водонасыщенной частью, то, естественно, процесс передачи воды к поверхности в тяжелых разностях грунтов выражен сильнее по сравнению с легкими.

Если представить, что в верхних частях зоны аэрации, т. е. в верхних слоях каймы удельная поверхность насыщенных водой капилляров постепенно уменьшается и при безграничном увеличении мощности зоны аэрации исчезает совсем, то следует ожидать существенный спад испарения грунтовых вод при опускании зеркала воды. Другими словами, зависимость испарения грунтовых вод от литологического состава почв в основном определяется интенсивностью капиллярных сил в зоне аэрации — над зеркалом грунтовых вод. Зависимость испарения от литологического состава пород выражена при разных глубинах залегания (0,5—3,0 *м*). Увеличение испарения грунтовых вод от легких грунтов к тяжелым наблюдается при разном покрове испаряющей поверхности (хлопчатник, люцерна первого года).

В лизиметрах с хлопчатником при снижении уровня грунтовых вод испарение в легких супесях на глубине 0,5 *м* уменьшается в среднем до 610 *мм;* 1,0 до 230, 1,5 до 145, 2,0 *м* до 120 *мм;* в тяжелых суглинках соответственно до 810, 730, 510, 340 *мм.* Следовательно, разница в показаниях лизиметров с легкой супесью и тяжелыми суглинками составляет 200 *мм,* 500, 365, 220 *мм.* В сред-

нем испарение в лизиметрах с легкой супесью на 60% меньше, чем в приборах с тяжелыми суглинками.

В лизиметрах с люцерной испарение в тяжелых суглинках по сравнению с легкой супесью также выше. Превышение при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* в среднем составляет 460 *мм*, при 1,5—530 *мм*. Следовательно, в лизиметрах с люцерной испарение в легких супесях по сравнению с тяжелыми суглинками меньше на 58%.

БУХАРСКИЙ И КАРАКУЛЬСКИЙ ОАЗИСЫ

В орошаемых оазисах Бухары испарение грунтовых вод изучалось с 1951 по 1971 г. под руководством М. М. Крылова и Д. М. Каца. Опытно-балансовый участок «Ширабуддин» функционировал в 1951—1961 гг. Применялись лизиметры площадью 0,1 $м^2$ в условиях пылеватых суглинков с хлопчатником, люцерной, естественной растительностью и оголенной почвенной поверхностью.

В 1966—1971 гг. исследования продолжались на участке «Камангарон» в лизиметрах площадью 1,44 $м^2$, засеянных хлопчатником, люцерной и с естественным покровом. Участки расположены в центральной части Бухарского оазиса, на третьей террасе р. Заравшана.

В 1960 г. на территории Каракульского оазиса проводились опыты в супесях с прослойками песков. Применялись лизиметры площадью 0,1 $м^2$ с хлопчатником. На этих площадках испарение изучалось наряду с транспирацией грунтовых вод, инфильтрационным питанием при моделировании глубины залегания уровня в 0,5; 0,7; 1,0; 1,35; 1,4; 1,5; 1,9; 2,0; 2,35; 2,5; 2,77; 3,0 *м* от поверхности земли.

В 1959 г. исследовалась зависимость испарения от минерализации грунтовых вод при градациях 0,75—1,80 *г/л*; 5,74—10,16 *г/л*. Определялось также влияние растительного покрова на испарение с почвенной поверхности.

С 1951 по 1971 г. испытано более чем 110 лизиметров.

По данным многолетних исследований получена зависимость испарения от глубины залегания грунтовых вод. Абсолютная величина испарения в лизиметрах с пылеватыми суглинками, естественной структурой грунтов, оголенной почвенной поверхностью при глубине 0,5 *м* в среднем изменяется от 750 *мм/год* до 80 *мм/год* при 2,77 *м*. Если принять первую цифру за 100%, то испарение с глубины 2,77 *мм* составляет 10,6%. В среднем при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* от поверхности земли оно равно 340 *мм/год*, при 1,5—230; 2,0—160; 2,5—110 *мм/год*.

Следовательно, критическая глубина для испарения грунтовых вод не установлена, так как в лизиметрах с оголенной почвой при предельной мощности зоны аэрации его величина составляет 80 *мм/год* (табл. 14).

В лизиметрах с естественной растительностью испарение грунтовых вод больше за счет транспирации, чем с почвенной поверхности. В лизиметрах с сорной растительностью в условиях Бухарского оазиса при глубине 0,5 *м* оно составило в среднем 1460 *мм/год*, что почти в 1,9 раза больше, чем показания лизиметров с оголенной почвенной поверхностью. С глубиной указанная разность выражается для 1,0 *м* — 2,3 раза, для 1,5 *м* — 1,4 раза.

Несколько повышенная величина испарения отмечается в лизиметрах с сорной растительностью при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м*, что, видимо, связано с большим развитием корневой системы. В лизиметрах с хлопчатником испарение грунтовых вод при увеличении мощности зоны аэрации снижается в среднем от

Таблица 14

Данные о величинах испарения грунтовых вод в лизиметрах с различной деятельной поверхностью, *мм/год*

Деятельная поверхность	Глубина, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	2,77
Естественная растительность	1460	910	340			
Оголенная почва	750	340	230	160	110	80
Отношение	1,9	2,3	1,4			
Хлопчатник	1400	930	580	350	170	
Оголенная почва	750	340	230	160	110	
Отношение	1,9	2,7	2,6	2,2	1,6	

1400 *мм/год* при 0,5 *м* до 80 *мм/год* (5,7%) при 3,0 *м*. При мощности зоны аэрации до 1,0 *м* среднемноголетние значения испарения грунтовых вод по лизиметру с естественной растительностью (910 *мм*) и хлопчатником (930 *мм*) почти совпадают, но с глубиной во втором случае оно больше. Так, при 1,5 *м* испарение равно 580 *мм*, а с естественным покровом — 340 *мм*.

Следовательно, испарение и транспирация грунтовых вод в лизиметрах с хлопчатником больше, чем с естественной растительностью. Эта разность выражена также при сравнении данных лизиметров с хлопчатником и оголенной почвенной поверхностью.

Испарение и транспирация грунтовых вод люцерной первого года посева составляет в среднем: для глубины 0,5 *м* — 1600 *мм*; 1,0 — 820; 1,5—490; 2,0—260; 2,5—90; 3,0 *м* — 40 *мм*.

Из сравнения приведенных цифр с данными табл. 14 можно заключить, что при глубине залегания грунтовых вод до 1,0 *м* от поверхности земли показания лизиметров с люцерной первого года выше, чем лизиметров с хлопчатником, а при больших глубинах — наоборот, что, видимо, связано с особенностями развития зеленой массы и корневой системы.

Для лизиметров с люцерной третьего года посева в отличие от других сельхозрастений ввиду развития корневой системы характерна прямая зависимость испарения и транспирации от глубины залегания грунтовых вод при мощности зоны аэрации до 2,0 *м*. На графике зависимости отмечается, что испарение с понижением уровня грунтовых вод в лизиметре увеличивается от 1580 *мм* при глубине 1,0 *м* до 1820 *мм* при 1,5 *м* и до 1900 *мм* при 2,0 *м*. Дальше, при 2,5 и 3,0 *м* абсолютная величина испарения снижается.

При анализе материалов испарения по Голодной степи отмечалась аналогичная картина, т. е. в лизиметрах с люцерной второго года испарение с глубиной увеличивалось, а в приборе с трехлетней снижалось, что мы объясняем старением корневой системы и редением ростков от корня зеленой массы. Люцерна на четвертом году развития теряет первоначальные биологические возможности, связанные с максимальным развитием, и, следовательно, наибольшим образованием зеленой массы, что приводит к снижению транспирационной способности. В Каракульском оазисе испарение и транспирация грунтовых вод изучались в условиях супесчаных грунтов с произрастанием хлопчатника.

Таблица 15

Сравнительная характеристика испарения грунтовых вод в лизиметрах в условиях произрастания хлопчатника, *мм/год*

Грунт	Глубина, *м*				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Пылеватые суглинки (Бухара)	930	580	350	170	80
Супеси (Каракуль)	510	390	280	160	90
Отношение	1,8	1,5	1,2	1,1	0,9

Величина испарения здесь меньше по сравнению с Ширабудинским участком Бухарского оазиса. В Каракульском оазисе в среднем для глубины 1,0 *м* она составляет 510 *мм;* 1,5—390; 2,0—280; 2,5—160; 3,0—90, а в Бухарском оазисе для тех же глубин в условиях пылеватых суглинков соответственно 930 *мм*, 580 *мм*, 350 *мм*, 170 *мм*, 80 *мм* (табл. 15).

Испарение грунтовых вод в пылеватых суглинках по сравнению с показателями лизиметров, заряженных супесями, в целом больше и только при глубине залегания 3,0 *м* этого не наблюдается. Это, видимо, связано с тем, что капиллярная кайма над уровнем грунтовых вод в обеих разновидностях пород находится ниже поверхности земли.

А. Р. Константинов (1968) на основе исследований в Валдайской научно-исследовательской лаборатории отмечает, что в испарителях ГГИ-3000 с увеличением солености воды интенсивность испарения с ее поверхности уменьшается вследствие понижения над ней упругости насыщенного пара.

В условиях, когда влага передается через зону аэрации по капиллярным порам, причина замедления испарения связана с увеличением вязкости воды при повышении ее минерализации. Разумеется, что изменение вязкости воды приводит к снижению сил менисков в капиллярных трубочках, в результате чего уменьшаются мениcковое сцепление и мощность капиллярной каймы над зеркалом грунтовых вод в зоне аэрации. Следовательно, при одном и том же положении зеркала грунтовой воды в лизиметрах с одинаковыми почвенными условиями, но с разной концентрацией солей высота капиллярной каймы будет изменяться. Так, большая минерализация раствора обусловливает меньшую высоту капиллярной каймы.

Обратная пропорциональность мощности капиллярной каймы по отношению к минерализации грунтовых вод приводит к занижению испарения и транспирации (табл. 16).

Таблица 16

Характеристика испарения при разной минерализации грунтовых вод, *мм/год*

Минерализация вод, *г/л*	Глубина, *м*				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,75—1,80	1510	870	470	180	90
1,46—2,32	1370	850	440	170	30
6,36—10,82	1260	420	350	140	80

Если принять испарение грунтовых вод с минерализацией 0,75—1,80 *г/л* за 100%, то при минерализации 1,46—2,32 *г/л* оно в среднем составит 82%, а с минерализацией 6,36—10,82 — 73%.

Следовательно, при изменении содержания плотного остатка в среднем от 1,0 до 8,5 *г/л* испарение и транспирация грунтовых вод снижаются соответственно на 18 и 27%, что существенно и следует принимать во внимание при расчете площадного испарения для больших регионов, расположенных на орошаемых массивах, где минерализация грунтовых вод разнообразна.

На воднобалансовых станциях Узбекистана специальные исследования по этому вопросу не производились, но мы попытались обобщить результаты многолетних данных по испарению, полученных в Голодной степи за 1967—1968 гг. в лизиметрах с непостоянной минерализацией грунтовых вод с люцерной площадью 1,44 $м^2$ и монолитным грунтом (рис. 8).

При низкой минерализации испарение повышается в апреле—сентябре, когда наряду с опреснением грунтовых вод и высокой температурой воздуха почвы наблюдаются большой дефицит влажности воздуха, значительная зеленая масса растений и т. д. Сле-

довательно, определяется климатическими, водохозяйственными условиями и возможностями транспирации.

Обоснованную зависимость испарения грунтовых вод от минерализации установить трудно, так как в лизиметрах за один сезон она меняется в широких пределах. Амплитуда колебания величины плотного остатка превышает 30,0 *г/л*. По данным опытно-балансового участка «Малик», в установках с естественной растительностью, хлопчатником, люцерной, кукурузой пределы изменений не превышают 10,2 *г/л*.

На Бухарской гидрогеологической станции, в лизиметрах с поливными культурами пределы изменений минерализации грунтовых вод—0,7—10,7 г/*л*, в Сурхандарьинской депрессии не превышают 10,1 *г/л*.

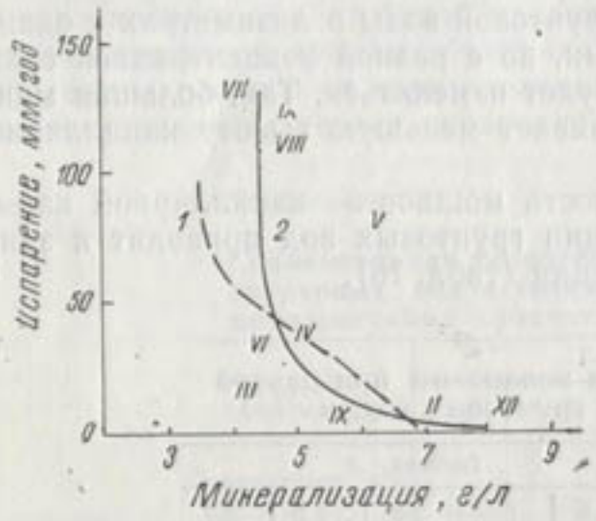


Рис. 8. Распределение интенсивности испарения по сезонам года на основании данных лизиметра № 45 с непостоянной минерализацией грунтовых вод:

1—1967 г.; *2*—1978 г.; римские цифры—месяцы.

В Чарджоуском оазисе, по данным И. С. Рабочева (1974), установлена зависимость между минерализацией и интенсивностью испарения грунтовых вод. В лизиметрах испытывались растворы с минерализацией 1,0; 5,0; 15,0 *г/л*. Испарение грунтовых вод уменьшалось независимо от мощности зоны аэрации. При изменении минерализации от 1,0 до 5,0 *г/л* при мощности зоны аэрации 3,0 *м* испарение грунтовых вод понизилось на 17%, при 5,0—15,0 *г/л* — на 27%.

Аналогичное снижение интенсивности испарения можно проследить и на глубине залегания грунтовых вод 2,0 и 1,0 *м* (табл. 17).

Сезонный режим испарения грунтовых вод в лизиметрах с оголенной почвенной поверхностью при мощности зоны аэрации 0.5 *м* тесно связан с солнечной радиацией, максимальное испарение (94,4 *мм*) фиксируется в июне. При снижении уровня грунтовых вод максимум сдвигается на более поздние сроки. Так, в лизиметрах с глубиной воды до 1,0 *м* он наблюдается в августе, а при 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 *м* — в сентябре, что связано с запаздыванием прогрева почвы, а также глубиной проникновения корневой системы растения. В лизиметрах с хлопчатником режим испарения грунтовых вод отличается от предыдущего. При мощности зоны аэрации более 0,5 *м* максимум наблюдается в августе и сентябре, а при 0,5 — в конце июня — начале июля. Отставание в режиме испарения в лизиметрах с хлопчатником можно объяснить развитием зеленой

массы растения и влияния инфильтрационной каймы, формирующейся над зеркалом грунтовых вод, в результате чего испарение

Таблица 17

Испарение и соленакопление грунтовых вод в луговой почве Чарджоуского оазиса (составил И. С. Рабочев)

Минерализация, *г/л*	Суммарное испарение, *мм*		Снижение испарения грунтовых вод, %	Соленакопление, *т/га*	Коэффиц. соленакопления при *S*=1*г/л* *H*=1*м*
	с дневной поверхности	с зеркала грунтовых вод			
		H=1 *м*			
1	1083	528	—	5,3	1,0
5	1056	502	3	25,0	4,83
15	975	434	18	66,0	12,45
		H=2 *м*			
1	1115	326	—	3,2	0,60
5	1146	298	9	14,5	2,74
15	1121	258	21	38,5	7,28
		H=3 *м*			
1	1120	146	—	1,5	0,28
5	1133	121	17	6,0	1,13
15	1105	107	27	15,0	2,84

Таблица 18

Сезонный режим испарения грунтовых вод в Бухарском оазисе, *мм*

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Месяцы												Сумма за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
					Оголенная почвенная поверхность								
0,5	13,0	21,2	40,8	62,6	75,8	94,4	84,3	72,0	51,4	33,7	27,7	17,2	596,7
1,0	16,3	2,9	33,9	18,5	36,2	45,6	41,9	45,8	44,9	26,7	22,7	8,0	343,4
1,5	15,3	2,3	9,8	13,2	24,2	29,0	31,8	33,2	35,1	25,8	19,5	8,6	247,8
2,0	10,1	4,4	7,7	10,5	16,2	20,1	19,7	21,0	21,0	18,9	15,5	9,6	174,7
2,5	8,0	3,3	3,4	5,1	10,3	16,7	15,7	16,1	17,3	16,0	13,7	8,4	134,0
3,0	5,8	3,3	3,4	3,8	4,8	4,0	7,4	8,6	9,0	8,4	4,3	3,7	61,7
					Хлопчатник								
1,0	14,0	3,6	18,0	18,0	30,4	42,7	122,9	210,0	254,1	166,6	44,3	17,1	941,7
1,5	11,4	5,6	1,8	8,6	14,4	10,3	73,4	121,4	274,4	183,0	28,3	13,7	746,3
2,0	15,3	9,0	0,5	3,7	11,2	3,4	42,9	38,0	91,1	95,0	32,9	18,6	361,6
2,5	7,4	5,4	—	—	2,6	—	—	5,7	23,3	46,9	23,9	13,4	128,6
3,0	10,3	6,6	7,5	1,4	3,2	0,9	0,3	8,2	10,9	23,8	15,0	7,5	95,6

прекращается и восстанавливается после сработки инфильтрационных вод.

В мае и июне с глубины 2,5 *м* испарение отсутствует и восстанавливается после очередной сработки инфильтрационных вод в связи с прекращением поливов и интенсивным расходованием влаги из зоны аэрации (табл. 18).

Следовательно, в орошаемых оазисах на режим испарения, кроме климатических факторов, влияют орошение и динамика фильтрационных вод в зоне аэрации, а также колебание уровня грунтовых вод. Многолетний режим в основном определяется климатическими условиями — водностью и режимом водоподачи.

ХОРЕЗМСКИЙ ОАЗИС

В 1957—1961 гг. в Шаватском районе на территории к-за «Коммунизм» исследования производились в условиях супесчано-суглинистых грунтов с приборами круглого сечения приемной площадью 0,1 $м^2$, с хлопчатником, люцерной, естественной растительностью, оголенной почвенной поверхностью, на глубине залегания грунтовых вод 0,5—3,0 *м*.

В Гурленском районе на территории к-за им. Ленина в 1968—1971 гг. в суглинках с прослойками супесей и глин испытывались лизиметры квадратного сечения площадью 1,44 $м^2$ с грунтом естественной структуры в условиях произрастания хлопчатника и глубиной залегания грунтовых вод от 1,0 до 3,0 *м*.

За многолетний период исследований испарения грунтовых вод в орошаемых районах Хорезма получены следующие результаты.

В условиях оголенной почвенной поверхности с увеличением мощности зоны аэрации испарение грунтовых вод уменьшается от 379 до 96 *мм/год*. В лизиметрах с естественной растительностью испарение больше и его абсолютная величина при глубине залегания грунтовых вод 0,5 *м* изменяется от 480 до 99 *мм/год* при 2,5 *м*.

Испарение в грунтах с хлопчатником при глубине залегания подземных вод 0,5 *м* снижается в среднем от 640 *мм* до 130 *мм/год* при 3,0 *м*. В Хорезмском оазисе максимум фиксируется в лизиметрах с люцерной — 1220 *мм/год* при глубине залегания 0,5 *м* от поверхности земли и 69 *мм/год* при 3,0 *м*.

НИЗОВЬЯ р. АМУДАРЬИ

Воднобалансовые работы начались в 1956 г. на Кегейлийском участке с лизиметрами площадью 0,84 $м^2$, глубиной залегания грунтовых вод 2,7 *м* от поверхности земли. Эксперименты проводились на солончаковом поле в супесчано-суглинистых грунтах.

В 1968 г. в связи с проведением детальных исследований по осушению территории г. Нукуса была организована лизиметрическая площадка, оборудованная приборами квадратного сечения (длина одной стороны 1,2 *м*) с естественной растительностью и оголенной почвой, всего 12, легкой супесью и моделированием зеркала грунтовых вод на глубине от 0,5 до 3,0 *м*.

По данным нукусских лизиметрических установок с естественной растительностью, испарение грунтовых вод изменяется от 1344 *мм/год* при мощности зоны аэрации 0,5 *м* до 536 *мм* при 1,5 *м*. В условиях оголенной почвенной поверхности его величина в легких супесях не превышала 410 *мм/год* при мощности зоны аэрации 0,5 *м*, снижаясь до 140 *мм/год* при 3,0 *м*.

Таблица 19

Испарение грунтовых вод, *мм/год*

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Низовья р. Амударьи						
Оголенная почва	410	235	224	185	—	140
Люцерна первого года	731	652	571	495	—	55
Сурхандарьинская депрессия						
Оголенная почва	190	120	70	40	20	10
Естественная растительность	970	610	340	160	70	40
Хлопчатник	1100	560	240	90	50	30
Люцерна первого года	1250	720	350	240	105	60

В 1969 г. на лизиметрической площадке «45 лет ВЛКСМ» установлено 15 лизиметров.

За 1969—1971 гг. изучена зависимость испарения грунтовых вод в лизиметрах с песчаным грунтом, люцерной, оголенной почвой. Испытания проводились в условиях естественной структуры грунтов (табл. 19).

КЫЗЫЛКУМЫ

На опытно-балансовом участке «Чингельды», около г. Тамды, были установлены лизиметры площадью 1,44 $м^2$, глубиной 0,9—2,27 *м*, которые заряжались монолитом из супесей с солончаковой коркой, естественной растительностью. По данным наблюдений, в 1970 г. испарение грунтовых вод при мощности зоны аэрации 0,9 *м* составило 443 *мм/год*, при 2,27 *м*—9,1 *мм/год*.

Средняя часть долины р. Зеравшана. На острове Мианкаль за 1967—1971 гг. испарение грунтовых вод в 8 лизиметрах, заряженных суглинком с шоховым горизонтом, было незначительным.

КАРШИНСКАЯ СТЕПЬ

С 1968 по 1971 г. на лизиметрической площадке «Бешкент» проводились опыты в условиях образования зоны аэрации плотными супесями с хлопчатником, люцерной и естественной растительностью. Наибольшая величина испарения грунтовых вод наблю-

дается в лизиметрах с люцерной, где при мощности зоны аэрации 1,0 *м* колеблется от 958 *мм/год* до 273 *мм/год* при 3,0 *м*. В условиях произрастания хлопчатника при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* она составляет в среднем 760 *мм*, 1,5—550; 2,0—390; 2,5—270; 3,0 *м*—220 *мм/год*.

В лизиметрах с естественной растительностью испарение грунтовых вод характеризуется следующими данными: 1,0 *м* — 570 *мм/год*; 1,5—420; 2,0—290; 2,5—210; 3,0—160 *мм/год*.

Анализ показал, что испарение грунтовых вод в приборах с естественной растительностью менее интенсивно, чем с хлопчатником и люцерной.

Основываясь на результатах лизиметрических исследований, проведенных в Каршинских степях, можно утверждать, что даже при мощности зоны аэрации 3,0 *м* наблюдается значительное испарение грунтовых вод — от 160 до 273 *мм*. Следовательно, критическая глубина испарения грунтовых вод находится ниже изученной мощности зоны аэрации.

СУРХАНДАРЬИНСКАЯ ДЕПРЕССИЯ

В 1957 г. на Талимаранском участке были начаты воднобалансовые исследования, которые продолжались до 1962 г. Для изучения испарения грунтовых вод применялись лизиметры площадью 0,1 $м^2$, с грунтами естественной структуры в условиях образования зоны аэрации супесями и суглинками, с хлопчатником, люцерной, естественной растительностью, а также оголенной почвенной поверхностью.

В 1959—1962 гг. в периферийной части конусов выноса рек Туполанга и Сангардака опыты проводились в условиях супесчаных грунтов с торфяным покровом в лизиметрах с малой площадью и различной деятельной поверхностью.

На периферийной части конуса выноса р. Шерабада в 1967—1971 гг. изучалось испарение в лизиметрах площадью 1,44 $м^2$ с хлопчатником, естественной растительностью и оголенной почвенной поверхностью. Наибольшее испарение грунтовых вод наблюдается в условиях произрастания люцерны, наименьшее — в лизиметре с оголенной почвенной поверхностью. Многолетние данные показали, что даже при глубине залегания грунтовых вод ниже 3,0 *м* испарение равно 60 *мм/год*. Следовательно, критическая глубина грунтовых вод в Сурхандарьинской депрессии не установлена.

При разнообразном литологическом строении, механическом составе грунтов, слагающих зону аэрации, под влиянием комплекса климатических и водохозяйственных условий испарение грунтовых вод в орошаемых районах Узбекистана характеризуется различной величиной (табл. 20). Наибольшие значения наблюдаются в оазисах Бухары, наименьшие — в низовьях р. Амударьи. Максимум испарения в оазисах Бухары объясняется наибольшей сухо-

Таблица 20

Сводные данные о среднемноголетних величинах испарения грунтовых вод в орошаемых районах Узбекистана

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, *м*						Грунт
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Голодная степь							
Оголенная почва	440	280	160	90	40	20	Суглинки средние
Естественная растительность	570	380	230	120	60	30	
Хлопчатник	670	450	310	200	130	100	
Люцерна первого года	1120	560	350	240	160	140	
Ферганская котловина							
Оголенная почва	310	120	60	40	20	20	Суглинки
Естественная растительность	820	510	360	180	80	40	
Хлопчатник	930	630	410	240	130	80	
Люцерна первого года	1160	870	680	650	370	180	
Бухарский оазис							
Оголенная почва	780	380	275	195	140	120	Суглинки
Естественная растительность	1460	910	490	355	255	210	
Хлопчатник	1400	940	600	370	250	180	
Люцерна первого года	1740	1030	710	430	260	190	
Каракульский оазис							
Оголенная почва	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Супеси
Естественная растительность	738	490	340	210	140	80	
Хлопчатник	780	580	420	320	220	140	
Люцерна первого года	1260	770	630	480	310	150	
Сурхандарья							
Оголенная почва	190	120	70	40	20	10	Супеси
Естественная растительность	970	610	340	160	70	40	
Хлопчатник	1100	560	240	90	50	30	
Люцерна первого года	1250	720	350	240	105	60	
Хорезмский оазис							
Оголенная почва	340	280	210	150	80	60	
Естественная растительность	420	310	230	180	120	90	
Хлопчатник	680	450	300	210	140	100	
Люцерна первого года	970	760	560	380	220	100	

Продолжение табл. 20

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, м						Грунт
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Каршинские степи							
Оголенная почва	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Супеси
Естественная растительность	755	570	420	290	210	160	
Хлопчатник	1020	760	550	390	270	220	
Люцерна первого года	1140	880	480	340	270	230	
Низовья р. Амударьи							
Оголенная почва	310	280	190	140	120	60	Супеси легкие
Естественная растительность	380	290	200	170	110	60	
Хлопчатник	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	
Люцерна первого года	830	650	530	490	300	180	

стью климата и естественной увлажненностью, минимум — в низовьях р. Амударьи — наличием в зоне аэрации легких по механическому составу грунтов, уменьшением испаряемости и несколько большим значением климатической увлажненности.

Величина испарения грунтовых вод на орошаемых землях Узбекистана при различных климатических и водохозяйственных условиях имеет разные абсолютные значения. Эта особенность установлена также Д. М. Кацем (1964) при сравнении данных по Хорезму, Бухаре, Фергане, Голодной степи, Сурхандарье. Он отмечает, что испарение грунтовых вод возрастает от северной части пустынь (665 *мм* — Хорезм) к южной (990 *мм* — Бухара; 1130 *мм* — Сурхандарья). Наибольшее испарение грунтовых вод наблюдается в Бухарском оазисе при глубине 0,5 *м*, изменяясь от 1430 до 90 *мм/год* при 3,0 *м*. В Ферганской котловине для этих глубин испарение равно соответственно 1020 и 0,0 *мм/год*, для Голодной степи — 640 и 80 *мм/год*. Испарение грунтовых вод в Бухарском оазисе в среднем на 43% больше, чем в Ферганской котловине, и в 1,69 раза, чем в Голодной степи.

Большая величина испарения грунтовых вод в Бухарском оазисе по сравнению с Ферганской котловиной и Голодной степью наряду с различием водохозяйственных условий объясняется также климатическими особенностями. Так, в первом районе норма среднегодовой температуры воздуха за 1951—1969 гг. на 0,5°С больше, чем во втором, и на 1,1°С, чем в третьем. Аналогичное соотношение испарения грунтовых вод по регионам получено в лизиметрах с оголенной почвенной поверхностью.

Анализ материалов многолетних лизиметрических наблюдений, проведенных в различных климатических зонах Узбекистана, характеризующихся различными интенсивностью процессов испаре-

ния, климатической увлажненностью, естественной растительностью, почвами, показывает, что соотношение величин испаре-

Таблица 21

Переходные коэффициенты между испарением грунтовых вод в лизиметрах с естественным покровом и деятельной поверхностью — хлопчатником, люцерной первого года (орошаемые районы Узбекистана)

Отношение испарения грунтовых вод в лизиметрах с разной деятельной поверхностью	Глубина залегания уровня грунтовых вод, м						Грунт
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Голодная степь							
Хлопчатник / Естественная растительность	1,17	1,18	1,35	1,66	2,16	3,33	Суглинки средние
Люцерна первого года / Естественная растительность	1,97	1,47	1,52	2,00	2,66	4,66	
Ферганская котловина							
Хлопчатник / Естественная растительность	1,14	1,23	1,14	1,33	1,40	2,00	Суглинки
Люцерна первого года / Естественная растительность	1,41	1,60	1,90	3,61	4,63	4,50	
Бухарский оазис							
Хлопчатник / Естественная растительность	0,95	1,03	1,23	1,05	0,98	0,86	Суглинки
Люцерна первого года / Естественная растительность	1,19	1,13	1,50	1,21	1,02	0,90	
Каракульский оазис							
Хлопчатник / Естественная растительность	1,04	1,18	1,24	1,52	1,57	1,75	Супеси
Люцерна первого года / Естественная растительность	1,74	1,58	1,86	2,29	2,21	1,87	
Сурхандарья							
Хлопчатник / Естественная растительность	1,13	0,91	0,70	0,56	0,71	0,75	Супеси
Люцерна первого года / Естественная растительность	1,28	1,18	1,03	1,50	1,50	1,50	

ния грунтовых вод с естественной растительностью, хлопчатником и люцерной различное (табл. 21). В целом переходный коэффици-

ент повышается с увеличением мощности зоны аэрации, что особенно наглядно видно по данным лизиметров с люцерной. Значение переходного коэффициента от естественной растительности к хлопчатнику изменяется в Голодной степи от 1,17 до 3,33; Ферганской котловине — от 1,14, до 2,00; Бухарском оазисе — от 0,86 до 1,23; Сурхандарье — от 0,56 до 1,13; к люцерне — от 0,90 до 4,66. Необходимо отметить, что изменение переходных коэффициентов наряду со многими факторами зависит от степени развития растений и оптимальных условий проведения лизиметрических исследований.

При сравнении испарения с почвы по регионам в лизиметрах с хлопчатником оказалось, что доля участия грунтовых вод меняется от 80,2% при глубине 0,5 *м* до 0,3% при 3,0 *м*. В целом доля участия грунтовых вод в общем испарении с почвенной поверхности уменьшается с понижением их уровня (табл. 22).

Таблица 22

Характеристика доли участия грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности в лизимерах с хлопчатником, %

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Низовья Амударьи	Сурхандарья	Бухарский оазис	Голодная степь
0,5	61,8	80,2	—	76,3
1,0	50,6	74,2	71,6	65,1
1,5	43,8	56,9	57,1	40,3
2,0	27,6	21,6	25,0	27,4
2,5	20,8	12,2	12,7	18,1

Таблица 23

Сравнительная характеристика (%) доли участия грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности в лизиметрах с люцерной разного возраста по Бухарскому оазису

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Год посева		
	первый	второй	третий
1,0	65,4	85,5	78,3
1,5	60,3	81,3	78,6
2,0	15,9	73,5	74,3
2,5	—	—	—
3,0	—	27,4	65,4

Таким образом, установлено, что испарение грунтовых вод зависит от климатических условий, почвенных разностей, глубины грунтовых вод, интенсивности орошения, других водохозяйственных мероприятий, а также инфильтрации поверхностных вод в зону аэрации и их динамики во времени.

В лизиметрах с люцерной участие грунтовых вод наблюдается даже при мощности зоны аэрации 3,0 м. Например, в Бухаре испарение грунтовых вод при глубине залегания 2,0—3,0 *м* составляет 15,9—52,4% от общего испарения с дневной поверхности (табл. 23).

В условиях («Камангарон») развития люцерны второго и третьего года посева доля участия грунтовых вод увеличивается. Так, испарение грунтовых вод на глубине 3,0 *м* составляет 65,4%, что связано с мощной корневой системой люцерны.

СЕВЕРНЫЙ ТАДЖИКИСТАН

В 1961 г. на территории Таджикской ССР в западной части Ферганской котловины организованы Хашим-Кульский и Каттаганский опытно-балансовые участки. На первом оборудованы лизиметрические площадки на хлопковом поле, люцерне, перелоге. Участок расположен на второй надпойменной террасе р. Сырдарьи, сложенной суглинистыми почвами. На Каттаганском участке зона аэрации образована супесями. Лизиметры цилиндрической формы площадью 0,4 $м^2$ заряжались грунтом естественной структуры; высота монолита 0,5—3,0 *м*.

В условиях Западной Ферганы расход грунтовых вод на испарение с обнаженной, сильно засоленной почвы, покрытой солевой коркой, незначителен и при глубине залегания грунтовых вод 0,5 *м* составляет 138 *мм/год;* 1,0—38; 1,5—29; 2,0—21; 2,5—15; 3,0—10 *мм/год*. В условиях произрастания хлопчатника расход влаги значительный и при мощности зоны аэрации 0,5 *м* составляет 1514 *мм/год;* 10 *м* — 745; 1,5 *м* — 318; 2,0 *м* — 217; 2,5 *м* — 113, 3,0 *м* — 22 *мм/год*. Связь испарения грунтовых вод с оголенной почвенной поверхности при глубине 0,5 *м* и относительной влажности воздуха характеризуется коэффициентом корреляции 0,83, по М. В. Бабаеву, а уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$У = -0{,}58x + 40{,}08,$$

где $У$ — испарение грунтовых вод, *мм*;

x — относительная влажность воздуха, %.

Доля участия грунтовых вод в общем испарении в условиях образования зоны аэрации из суглинков с хлопчатником составляет: 0,77 при глубине залегания грунтовых вод 0,5 *м* от поверхности земли; 0,59 при 1,0 *м;* 0,37—1,5 *м;* 0,27—2,0 *м;* 0,14—2,5 *м;* 0,03—3,0 *м*.

ЮЖНЫЙ ТАДЖИКИСТАН

В 1961 г. в долине р. Вахша в 10,0 *км* юго-западнее г. Курган-Тюбе испарение грунтовых вод изучалось на трех участках, сложенных различными грунтами. Первый образован преимущественно глинами (42 лизиметра); второй — суглинками с прослойками супеси (23), третий — супесями и суглинками (17).

В лизиметрических установках площадью 0,4 $м^2$ испарение определялось при мощности зоны аэрации от 0,5 до 3,0 *м* в условиях выращивания хлопчатника, люцерны, бахчевых культур, а также естественной растительностью и оголенной почвенной поверхностью.

В Кызылсу-Яхсуйской долине на окраине Восье измерения проводились в 36 установках с супесчаными грунтами хлопчатником, люцерной, естественной растительностью и оголенной почвенной поверхностью.

На Курган-Тюбинском участке испытывались суглинистые грунты с оголенной почвенной поверхностью. Абсолютная величина испарения грунтовых вод при 0,5 *м* составила 401 *мм/год*, при увеличении мощности зоны аэрации до 3,0 *м* — 13 *мм/год*. Испарение грунтовых вод на перелоге оказалось выше при идентичности зависимости от глубины залегания. В лизиметрах с хлопчатником получена еще большая величина. Экстремальные значения установлены в лизиметрах с люцерной.

Интенсивность испарения грунтовых вод зависит от мощности зоны аэрации и характера деятельной поверхности.

Таблица 24

Сводные данные о среднемноголетних величинах испарения грунтовых вод в орошаемых районах Таджикистана, *мм/год*

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, *м*						Грунт
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Западная Фергана							
Оголенная почва	138	38	29	21	15	10	Суглинок
Хлопчатник	1514	745	318	217	113	22	
Вахшская долина							
Оголенная почва	280	175	110	80	50	35	Суглинки
Естественная растительность	830	690	590	470	400	330	
Хлопчатник	620	460	340	230	160	100	
Люцерна первого года	1010	750	530	360	210	90	
Кызылсу-Яхсуйская долина							
Оголенная почва	430	270	160	80	40	40	Легкие супеси
Естественная растительность	1520	1140	880	630	400	230	
Хлопчатник	Н. с.	750	400	200	160	100	

На Восьейском участке получены аналогичные зависимости испарения грунтовых вод, но с меньшими абсолютными значениями, свойственными условиям образования зоны аэрации легкими супесями.

Анализ испарения грунтовых вод в орошаемых районах Таджикской ССР показал, что во внутригорных впадинах его величина значительно выше, чем в предгорных равнинах (табл. 24). Это, видимо, объясняется значительной сухостью климата и незначительной климатической увлажненностью.

В долине р. Вахша испарение грунтовых вод естественной растительностью больше, чем хлопчатником (по данным Курган-тюбинской гидрогеологической станции). Переходный коэффициент

к испарению с люцерновым покровом в интервалах глубины залегания грунтовых вод от поверхности до 1,0 *м* больше единицы снижается до 0,28 (табл. 25) при глубине 3,0 *м*. Доля испарения грунтовых вод зависит от мощности зоны аэрации и вида деятельной поверхности.

На Курган-Тюбинском опытно-балансовом участке получена количественная характеристика доли грунтовых вод в общем испарении в глинах, суглинках и супесях с разной деятельной поверхностью (табл. 26). В лизиметрах с естественной растительностью в интервале глубин 0,5—2,0 *м* она колеблется от 0,84 до 0,64.

В приборах с люцерной первого года посева расход грунтовых вод в общем испарении при мощности зоны аэрации от 0,5 до 3,0 *м*

Таблица 25

Переходные коэффициенты от испарения грунтовых вод в лизиметрах с естественной растительностью к испарению с деятельной поверхностью (хлопчатник, люцерна)

Соотношение испарения грунтовых вод в лизиметрах с разной деятельной поверхностью	Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Дельта р. Мургаба						
Хлопчатник / Естественная растительность	0,79	0,67	0,76	0,80	0,69	0,86
Люцерна первого года / Естественная растительность	0,80	0,69	0,85	1,15	1,23	1,27
Вахшская долина						
Хлопчатник / Естественная растительность	0,74	0,66	0,58	0,49	0,40	0,30
Люцерна первого года / Естественная растительность	1,23	1,09	0,90	0,77	0,52	0,28

составляет 60—22%, с люцерной второго года — 79 и 43% соответственно; в условиях произрастания люцерны третьего года снижается.

Доля испарения грунтовых вод в глинистых грунтах с хлопчатником изменяется от 0,59 при глубине залегания грунтовых вод 0,5 *м* до 0,08 при 3,0 *м*. В приборах с кукурузой и овощными культурами доля испарения грунтовых вод составляет не более 50% (табл. 26).

МУГАНСКАЯ СТЕПЬ

В Муганской степи Азербайджанской гидрогеологической партией организована лизиметрическая площадка из 18 установок в суглинисто-супесчаных грунтах с хлопчатником, люцерной, естест-

Таблица 26

Среднемесячные значения доли грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности (долина р. Вахша)

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, м						Грунт
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Естественная растительность	0,81	0,72	0,70	0,64	—	—	Глины с прослойками суглинков
	—	—	—	0,69	0,64	0,66	Суглинки с прослойками супеси
Люцерна первого года	0,60	0,56	0,47	0,34	—	—	Глины с прослойками суглинков
	—	—	—	—	0,52	0,36	Суглинки с прослойками супеси
	—	—	—	—	0,37	0,22	Супеси с прослойками суглинков
Люцерна второго года	0,79	0,66	0,62	0,57	—	—	Глины с прослойками супеси
	—	—	—	—	0,62	0,63	Супеси с прослойками суглинков
	—	—	—	—	0,44	0,43	Супеси с прослойками суглинков
Люцерна третьего года	—	0,39	0,24	0,23	—	—	Глины с прослойками суглинков
	—	—	—	—	0,47	0,35	Супеси с прослойками суглинков
Кукуруза	0,5	—	—	—	—	—	Супеси с прослойками суглинков
	—	—	—	—	0,15	0,02	Суглинки с прослойками супеси
Свекла	—	—	—	—	0,32	0,21	Суглинки с прослойками супеси
Картофель	—	—	—	—	0,16	0,11	Суглинки с прослойками супеси
Капуста	—	—	—	0,13	—	0,04	Суглинки с прослойками супеси
Хлопчатник	0,59	0,46	0,34	0,24	0,18	0,08	Глины с прослойками супеси

венной растительностью, пшеницей, кукурузой, а также оголенной почвенной поверхностью. В лизиметрах глубина залегания грунтовых вод моделировалась от 0,4 до 2,9 *м*.

За период исследований (1965—1972 гг.) получены характеристики испарения грунтовых вод, а также зависимость от глубины залегания и растительного покрова (табл. 27).

Повышенное испарение грунтовых вод наблюдается в лизиметрах с люцерной и при мощности зоны аэрации 1,0 *м* изменяется в

Таблица 27

Среднемноголетние величины испарения грунтовых вод (*мм/год*) в легких суглинках (Муганская степь)

Деятельная поверхность	Глубина залегания грунтовых вод, *м*						
	0,4	0,7	1,0	1,4	1,9	2,4	2,9
Оголенная почва	66	37	27	21	17	15	12
Естественная растительность	730	601	432	278	186	104	47
Хлопчатник	—	—	473	351	292	158	49
Люцерна первого года	—	—	1108	610	507	243	110

среднем от 1108 до 110 *мм* при 3,0 *м;* в лизиметрах с хлопчатником оно меньше и соответственно равно 473 и 49 *мм/год,* а в при-

Таблица 28

Переходные коэффициенты от испарения грунтовых вод в лизиметрах с естественным покровом к испарению с деятельной поверхностью (хлопчатник, люцерна)

Соотношение величин испарения грунтовых вод	Глубина залегания грунтовых вод, *м*				
	1,0	1,4	1,9	2,4	2,9
Хлопчатник / Естественная растительность	1,14	1,26	1,57	1,51	0,96
Люцерна первого года / Естественная растительность	2,56	2,19	2,72	2,31	2,24

борах с естественной растительностью 432 и 47 *мм/год,* с оголенной почвенной поверхностью на глубине 0,4 *м* составляет 66 *мм/год;* 0,7—37; 1,0—27; 1,4—21; 1,9—17; 2,4—25; 2,9 *м* — 12 *мм/год.* При мощности зоны аэрации 0,4 *м* испарение в приборах с оголенной почвенной поверхностью в 11 раз меньше, чем с естественной растительностью, а при мощности 2,9 *м* — в 3,8 раза.

При соотношении испарения грунтовых вод в приборах с естественной растительностью, хлопчатником и люцерной первого года прослеживается определенная закономерность. Так, в условиях Муганской степи при глубине залегания грунтовых вод выше 2,9 *м* испарение в приборах с естественной растительностью меньше, чем с хлопчатником и люцерной первого года посева (табл. 29).

Коэффициент перехода испарения с естественной растительностью к приборам с хлопчатником изменяется от 1,14 до 1,51; с люцерной — от 2,19 до 2,72. При глубине залегания 2,9 *м* коэффициент перехода по хлопчатнику — 0,96, по люцерне первого года — 2,24.

ШИРВАНСКАЯ СТЕПЬ

В 1967 г. на засоленных суглинистых почвах конуса выноса Геокчай организована лизиметрическая площадка с девятью установками круглого сечения, заряженными монолитом с хлопчатником, люцерной, естественной растительностью, оголенной почвой.

Ввиду высокой минерализации и засоленности почв величина испарения грунтовых вод на этом участке оказалась меньше, чем

Таблица 29

Среднемноголетние данные о доле испарения грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности

Деятельная поверхность	Мощность зоны аэрации, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Муганская степь (суглинки)						
Хлопчатник	—	0,66	0,53	0,48	0,32	0,14
Ленкоранская низменность (суглинки)						
Огурцы	0,53	0,44	0,28	0,03	—	—
Дельта р. Мургаба (супеси)						
Естественная растительность		0,52		0,38		0,34
Хлопчатник		0,41		0,33		0,28
Оголенная почва		0,57		0,23		0,12

в условиях Муганской степи. По данным Уджарской лизиметрической площадки, при мощности зоны аэрации 0,5 *м* и минерализации грунтовых вод 24,0 *г/л* для деятельной поверхности с хлопчатником испарение составило 64 *мм/год*, с люцерной — 61, естественной растительностью — 67, оголенной почвенной поверхностью — 58 *мм/год*. Незначительные величины испарения грунтовых вод, видимо, связаны с высокой минерализацией. Доля испарения грунтовых вод, изученная на орошаемых землях Азербайджана, также зависит от мощности зоны аэрации, деятельной поверхности и, конечно, климатических условий (табл. 29). В приборах с хлопчатником изменяется от 0,66 до 0,14 при мощности зоны аэрации от 1,0 до 3,0 *м*, с люцерной второго года посева при 2,0 *м* составляет 0,60; с люцерной первого — 0,48.

В Ленкоранской низменности (субтропики) доля грунтовых вод в общем расходе влаги с поверхности почвы изменяется от 0,44

при глубине 1,0 до 0,03 *м* при 2,5 *м*, что значительно ниже данных, полученных в Муганской степи.

МУРГАБСКИЙ ОАЗИС

С 1962 г. в дельте р. Мургаба изучается испарение грунтовых вод на орошаемых землях. На опытно-балансовом участке установлены лизиметры с моделированием глубины залегания грунтовых вод от 0,9 до 2,8 *м* в супесчаных грунтах с хлопчатником, люцерной, естественной растительностью и оголенной почвенной поверхностью.

Величины испарения грунтовых вод, полученные в Мургабе, по абсолютной величине близки к данным по Бухарскому и Каракульскому оазисам. Расход при мощности зоны аэрации 0,5 *м* с оголенной почвенной поверхности составляет 280 *мм/год*. При увеличении мощности его интенсивность падает до 20 *мм/год*. Это наблюдается также в лизиметрах с хлопчатником, естественной растительностью и люцерной. Максимальное испарение при покрове люцерны (табл. 30) на глубине залегания грунтовых вод 0,5 *м*—

Таблица 30

Среднемноголетние величины испарения грунтовых вод в супесях дельты р. Мургаба

Деятельная поверхность	Глубина залегания грунтовых вод, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Оголенная почва	280	161	120	95	35	20
Естественная растительность	940	780	420	200	130	110
Хлопчатник	750	530	320	160	90	40
Люцерна первого года	760	540	360	230	160	140

760 *мм/год*, при 3,0 *м* — 140 *мм/год*. На глубине 3,5 *м* от поверхности земли испарение грунтовых вод составляет в среднем 130 *мм/год*.

Переходные коэффициенты по испарению грунтовых в лизиметрах с естественной растительностью, в приборах с хлопчатником и люцерной первого года посева с глубиной в целом увеличиваются от 0,67 до 1,27; для хлопчатника — от 0,67 до 0,80, для люцерны первого года посева — от 0,69 до 1,27. По сравнению с другими оазисами здесь переходные коэффициенты пониженные, что, видимо, связано с особенностями развития естественной растительности. Доля грунтовых вод в общем испарении с почвенной поверхности для условий дельты р. Мургаба приведена в табл. 29.

ТАШАУЗСКИЙ ОАЗИС

В 1969 г. в 18 *км* южнее г. Ташауза организованы детальные водно-балансовые исследования. На площадке, прилегающей к пе-

реложным землям, на легких супесях оборудованы 24 лизиметрические установки с грунтом естественной структуры, с деятельной поверхностью — люцерной, естественной растительностью, оголенной почвенной поверхностью (табл. 31).

Переходные коэффициенты от испарения грунтовых вод с естественной растительностью к испарению в приборах с люцерной первого года высокие и изменяются от 2,0 до 5,5.

Доля грунтовых вод в общем испарении на шоре в легких супесях с солончаковой коркой при мощности зоны аэрации 0,5 *м* составляет 70%; 1,0 *м* — 60%, 1,5 *м* — 40%, на залежи с сильнозасоленной супесью — 77% при 0,5 *м*; 67% при 1,0 *м*, 54 — 1,5, 31—2,0, 26% — при 2,5 *м*.

Таблица 31

Среднемноголетние величины испарения грунтовых вод в легких супесях Ташаузского оазиса, *мм/год*

Деятельная поверхность	Мощность зоны аэрации, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Оголенная почва	190	90	30	20	20	20
Естественная растительность	380	130	60	40	20	20
Люцерна первого года посева	850	560	330	160	60	40

Таким образом, доля грунтовых вод в общем испарении с увеличением мощности зоны аэрации уменьшается. На солончаках величина коэффициента ниже, чем на сильнозасоленных почвах.

СЕВЕРНАЯ КИРГИЗИЯ

В 1959—1962 гг. в пределах Чуйской межгорной впадины на конусе выноса р. Джарлы-Каинды организован Чалдоварский опытно-балансовый участок, где в комплексе воднобалансовых исследований велись и лизиметрические.

В гидрогеологическом отношении участок приурочен к зоне слабого выклинивания и неглубокого залегания грунтовых вод, сложенной до глубины 12,0 *м* суглинками и супесями с прослоями разнозернистых песков, а ниже — галечником. Здесь установлено 14 лизиметров площадью 0,63 *м*² с насыпным грунтом на орошаемом поле, глубиной воды 0,4; 0,7; 1,5, 2,5 *м* от поверхности земли. Три лизиметра заряжались монолитом на неорошаемом поле с глубиной воды 0,95; 1,15 и 1,85 *м*. Грунтовые воды исследовались под сахарной свеклой, люцерной и оголенной почвой, на неорошаемом поле — под оголенной почвой. Наблюдения проводились в основном в вегетационный период, и только за 1962 г. имеется годовой цикл, когда деятельная поверхность представлена люцерной первого года посева и оголенной почвой. Максимальный расход грунтовых вод с оголенной почвы на глубине 0,5 *м* от поверхности земли составляет 340 *мм/год*, 1,0 — 210; 1,5—130; 2,0—70 и 2,5—40 *мм/год*.

По результатам лизиметрических определений, испарение грунтовых вод под люцерной первого года посева при насыпном грунте из суглинков описывается вогнутой криволинейной зависимостью, интенсивно возрастающей с уменьшением глубины залегания грунтовых вод, особенно до 2 *м*. Такое резкое увеличение объясняется высокой транспирационной способностью люцерны. Максимальное испарение грунтовых вод отмечается на глубине 0,5 *м* от поверхности земли и составляет 1050 *мм/год*, с глубиной оно уменьшается и на 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 *м* составляет 660, 370, 200, 160 и 120 *мм/год* соответственно. Если величину испарения грунтовых вод на глубине 0,5 *м* принять за 100%, то на последующих отметках она составит 63%, 33, 19, 15 и 11 от первоначальной.

ЮЖНЫЙ КАЗАХСТАН

Туркестанская гидрогеологическая станция Министерства геологии КазССР проводит лизиметрические исследования на Турткульском опытно-балансовом участке, расположенном севернее г. Туркестана у южного склона хребта Каратау, представленном гравийно-галечниковыми отложениями, перекрытыми суглинисто-супесчаным мелкоземом. Непосредственно на площадке покровный мелкозем до глубины 3 *м* представлен суглинками с прослойками супеси.

С 1968 по 1971 г. исследовались 12 лизиметров площадью 1,44 *м*², заряженных суглинком естественной структуры, в которых моделировалась глубина 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 *м*. К настоящему времени годичный цикл наблюдений получен для деятельной поверхности, представленной хлопчатником и оголенной почвой. Годовая величина испарения грунтовых вод под оголенной почвой на глубине залегания 0,5 *м* составляет 240 *мм*, на 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 *м* — соответственно 210 *мм/год*, 80 и 40, или 84, 72, 50, 32 и 16% по отношению к испарению с глубины 0,5 *м*. Транспирация хлопчатником на глубине залегания грунтовых вод до 2—2,5 *м* играет основную роль в процессе суммарного испарения грунтовых вод, годовая величина которых под хлопчатником составляет 930 *мм*. С увеличением глубины она уменьшается: при 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 *м* соответственно составляет 600, 360, 180, 80 и 40 *мм/год*, или 66, 39, 20, 9 и 4% по отношению к испарению с глубины 0,5 *м*.

ЗАВИСИМОСТЬ ИСПАРЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И КЛИМАТИЧЕСКОЙ УВЛАЖНЕННОСТИ

На опытно-балансовых участках, расположенных в хлопковой зоне СССР, изучается зависимость расхода грунтовых вод от испаряемости, температуры воздуха, мощности зоны аэрации, расти-

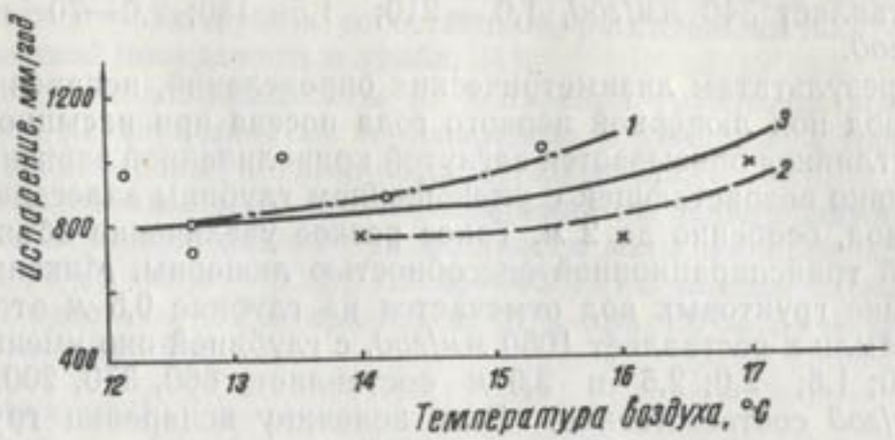


Рис. 9. Связь испарения грунтовых вод с температурой воздуха:

1—для зоны ничтожного увлажнения; *2*—скудного; *3*—средняя кривая зависимости.

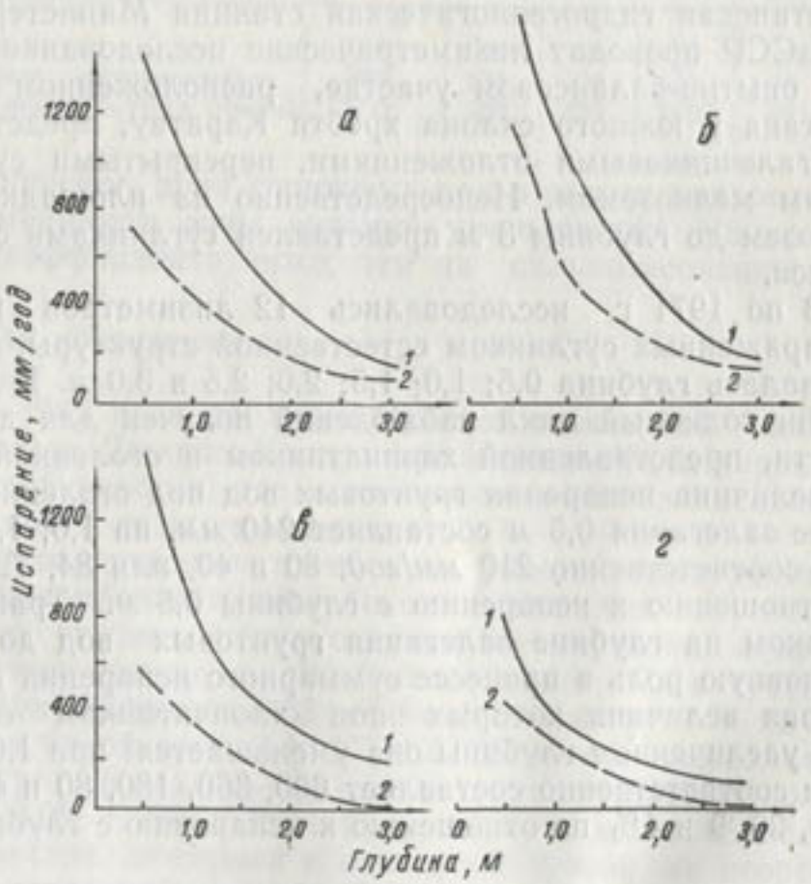


Рис. 10. Совмещенные графики зависимости испарения грунтовых вод от мощности зоны аэрации по зонам ничтожного (*1*) и скудного (*2*) увлажнения при различной деятельной поверхности:

а—хлопчатник; *б*—люцерна первого года посева; *в*—естественная растительность; *г*—оголенная почва.

Таблица 32

Среднемноголетняя величина испарения грунтовых вод в орошаемых районах хлопковой зоны СССР, *мм/год*

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Узбекская ССР						
Голодная степь (суглинки средние)						
Оголенная почва	440	280	160	90	40	20
Естественная растительность	570	380	230	120	60	30
Хлопчатник	670	450	310	200	130	100
Люцерна первого года	1120	560	350	240	160	140
Ферганская котловина (суглинки)						
Оголенная почва	310	120	60	40	20	20
Естественная растительность	820	510	360	180	80	40
Хлопчатник	930	630	410	240	130	80
Люцерна первого года	1160	870	680	650	370	180
Бухарский оазис (суглинки)						
Оголенная почва	780	380	275	195	140	120
Естественная растительность	1460	910	490	355	255	210
Хлопчатник	1400	940	600	370	250	180
Люцерна первого года	1740	1030	710	430	260	190
Каракульский оазис (супеси)						
Оголенная почва	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.
Естественная растительность	738	490	340	210	140	80
Хлопчатник	780	580	420	320	220	140
Люцерна первого года	1260	770	630	480	310	150
Сурхандарья (супеси)						
Оголенная почва	190	120	70	40	20	10
Естественная растительность	970	610	340	160	70	40
Хлопчатник	1100	560	240	90	50	30
Люцерна первого года	1250	720	350	240	105	60
Каршинские степи (супеси)						
Оголенная почва	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.
Естественная растительность	755	570	420	290	210	160
Хлопчатник	1020	760	550	390	270	220
Люцерна первого года	1140	880	480	340	270	230
Хорезмский оазис (супеси)						
Оголенная почва	340	280	210	150	80	60
Естественная растительность	420	310	230	180	120	90
Хлопчатник	680	450	300	210	140	100
Люцерна первого года	970	760	560	380	220	100

Продолжение табл. 32

Деятельная поверхность	Глубина до уровня грунтовых вод, м					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Низовья р. Амударьи (супеси легкие)						
Оголенная почва	310	280	190	140	120	60
Естественная растительность	380	290	200	170	110	60
Хлопчатник	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.
Люцерна первого года	830	650	530	490	300	180
Таджикская ССР						
Южный Таджикистан (суглинок)						
Оголенная почва	280	175	110	80	50	35
Естественная растительность	830	690	590	470	400	330
Хлопчатник	620	460	340	230	160	100
Люцерна первого года	1010	750	530	360	210	90
Азербайджанская ССР						
Муганская степь (суглинки легкие)						
Оголенная почва	66	26	21	17	14	12
Естественная растительность	730	432	278	196	104	49
Хлопчатник	Н. с.	473	351	292	158	47
Люцерна первого года	Н. с.	1108	610	507	243	110
Туркменская ССР						
Ташаузский оазис (супесь легкая)						
Оголенная почва	190	90	30	20	20	Н. с.
Естественная растительность	380	130	60	40	20	20
Хлопчатник	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.
Люцерна первого года	850	560	330	160	60	40
Теджен-Мургабский оазис (супесь)						
Оголенная почва	280	161	120	95	35	20
Естественная растительность	940	780	420	200	130	110
Хлопчатник	750	530	320	160	90	40
Люцерна первого года	760	540	360	230	160	140
Киргизская ССР						
Чуйская долина (суглинок)						
Оголенная почва	340	210	130	70	40	Н. с.
Естественная растительность	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.
Хлопчатник	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.	Н. с.
Люцерна первого года	1050	660	370	200	160	120
Казахская ССР						
Южный Казахстан (суглинок)						
Оголенная почва	240	210	180	120	80	40
Естественная растительность	770	480	290	130	90	50
Хлопчатник	930	600	360	180	80	40
Люцерна первого года	1385	715	445	260	230	130

тельного покрова, механического состава грунтов. Влияние остальных факторов изучено недостаточно.

Анализ материалов многолетних наблюдений (1951—1972 гг.) позволяет установить связь испарения грунтовых вод с температурой воздуха. С увеличением мощности зоны аэрации влияние температуры на испарение ослабевает. В зоне ничтожного увлажнения оно интенсивнее, чем в зоне скудного, и проявляется косвенно — через сухость климата, транспирационную способность растения и влажность почвы (рис. 9).

Испарение грунтовых вод, как и процесс суммарного испарения, в основном определяется испаряемостью. В пределах хлопковой зоны СССР в предгорьях Большого Кавказа она изменяется от 600 до 2400 *мм* в Туркменских Каракумах. Внутри таких регионов, как Кура-Араксинская низменность, Ферганская котловина, Сурхандарьинская депрессия, Голодная степь, Чирчик-Ангренский бассейн испаряемость с высотой местности уменьшается.

На рис. 10 показана зависимость испарения по двум зонам — с ничтожной и скудной увлажненностью. В первой зоне величина испарения грунтовых вод характеризуется большими значениями.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ И СПОСОБА ЗАМЕРА НА ТОЧНОСТЬ ПОКАЗАНИЙ ЛИЗИМЕТРОВ

Экспериментальное определение испарения грунтовых вод связано с систематическими ошибками методического и определительского характера, что в конечном счете влияет на качество получаемого фактического материала. Если для уменьшения ошибок методического профиля нужно учащать замеры в связи с необходимостью частого долива и отлива воды, чтобы поддерживать постоянный уровень грунтовых вод в лизиметре, то для уменьшения допускаемых ошибок определительского характера необходимы редкие замеры. Таким образом, частота замеров может оказывать определенное влияние на качество исходного материала, накапливаемого на опытно-балансовых участках.

Сработка уровня грунтовых вод в лизиметре между начальным и конечным сроками наблюдений может привести к занижению испарения в результате увеличения мощности аэрации. Для наглядности воспользуемся анализом М. С. Алимова. Принимаем промежуток времени между первым и вторым замерами за одни сутки. В лизиметре горизонт воды на глубине 1,0 *м* от поверхности земли в начале опыта — T_1. В конце опыта T_2 уровень под влиянием испарения и транспирации снизился на $H_0=0{,}12$ *м* по сравнению с исходным, при этом мощность зоны аэрации составит $H_1=H+H_0$, или 1,12 *м*. Долив воду в лизиметр снова до глубины 1,0 *м*, получаем, что испарение за сутки составило 60 $м^3/га=6$ *мм*.

При трехкратном замере (утром, в полдень и вечером) абсолютные величины испарения характеризуются следующими данны-

ми: до 13 часов уровень воды в лизиметре опустился на 0,07 *м* ($H_1=1{,}0+0{,}07=1{,}07$ *м*); величина испарения — 3,0 *м³/га*, или 0,3 *мм*. С 13 до 20 час. 30 мин. уровень воды снизился на 0,09 *м* ($H_1=1{,}0+0{,}09=1{,}09$ *м*); величина испарения — 38,5 *м³/га*, или 3,85 *мм*.

Суммарное значение снижения уровня за сутки равно 0,16; величина испарения — 41,5 *м³/га*, или 4,15 *мм* и т. д.

Объем доливаемой в лизиметр для компенсации испарившейся воды М. С. Алимов рассчитывает по уравнению (8).

$$Q_b=B(n-b),$$

где Q_b — объем доливаемой воды, *м³*;
B — объем монолита, *м³*;
n — пористость грунта;
b — естественная влажность грунта.

Замеряется статистический уровень воды в лизиметре по наблюдательной трубке и производится долив по питательной, причем количество доливаемой воды измеряется объемным методом — мензуркой. В этот период вентиль для прохода инфильтрационных вод закрыт. Уровень воды в лизиметре на некоторую величину повышается. При этом в питательной трубе создается напор. Через некоторое время уровень воды в питательной и наблюдательной трубках становится одинаковым. Ручной замер уровня воды в питательной трубке производится хлопушкой, точность не превышает ±1 *см*. Тогда при площади живого сечения лизиметра 1,44 *м²*, условной мощности монолита 1,0 *см*, пористости 0,47, естественной влажности грунтов 0,24 ошибка в определении объема доливаемой воды составит 3,3 *л*. Допускаемая ошибка в определении объема доливаемой воды пропорциональна частоте замеров и испаряющей поверхности лизиметров. Поэтому при ручном наблюдении возникла необходимость в уменьшении частоты замеров до минимума, если не определяется суточный ход.

В практике воднобалансовых работ с 1963 г. на гидрогеологических станциях в целях повышения точности лизиметрических исследований внедрен метод централизованного регулирования уровня грунтовых вод в лизиметрах. Это улучшило методическую сторону измерений, но определительских ошибок не ликвидировало. Павильонный метод и централизованный долив воды в лизиметр исключили необходимость в учащенных замерах; точность при одноразовом замере доведена до 0,2 *см*. Объем расходуемой на испарение воды в лизиметрах автоматизированным способом определяется по градуированной шкале питающей емкости (бутыль 10—20 *л*) с точностью отсчетов до 2 *мм*. Ошибка зависит от площади поперечного сечения питающей емкости, так как ее увеличение прямо пропорционально объему воды, приходящейся на слой 2 *мм* (точность замеров по градуированной шкале). Так, бутыль объемом 10 *л* имеет диаметр 24 *см*, или радиус 12 *см*. Тогда площадь поперечного сечения — 37,6 *см²*, а на слой 0,2 *см* приходится 7,5 *см³*. Если бутыль объемом 20 *л*, диаметром 30 *см*, радиусом 15 *см*, то площадь живого сечения — 47,1 *см²*, а на слой 0,2 *см* приходится 9,4 *см³* воды. Следовательно, при централизованном способе долива воды в лизиметр из питающих емкостей ошибка в измерении пропорциональна размерам питающих сосудов.

Для уменьшения ошибок в определении величины испарения грунтовых вод с применением лизиметров частоту замеров необходимо принимать минимальной — один раз в сутки, используя небольшие питающие емкости. Оптимальными размерами нужно считать такие, при которых величина испарения между сроками наблюдений превышает допустимую ошибку в определении объема израсходованной воды в слое, большем чем точность замеров, — 0,5 *мм*.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА МОДЕЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ИСПАРЕНИЕ

На опытно-балансовых участках «Малик» (1966—1968 гг.), «Камангарон» (1967—1972 гг.) лизиметрические исследования проводились в установках с постоянным и искусственно-переменным уровнем грунтовых вод при различной мощности зоны аэрации в условиях произрастания хлопчатника. Испытывалось более 27 лизиметров.

Кратко осветим сущность применяемых методов моделирования постоянного и искусственно-переменного уровня. Постоянный уровень поддерживается доливом при испарении и отливом при инфильтрационном питании определенного объема воды из прибора. Искусственно-переменный уровень формируется в лизиметре под влиянием инфильтрации атмосферных осадков, промывных и оросительных вод в испытуемый грунт с образованием ирригационно-грунтовых вод над зеркалом подземных. В процессе опыта срабатываются ирригационно-грунтовые воды в лизиметре. До полной сработки долив или отлив воды из лизиметра не производится, сохраняется переменный уровень грунтовых вод, динамика которого обеспечивается инфильтрацией поверхностных вод, осадков и последующим их испарением. Следовательно, в приборах с искусственно-переменным уровнем грунтовые воды расходуются при меньших мощностях зоны аэрации и после сработки запасов ирригационно-грунтовых, тогда как в лизиметрах с постоянным уровнем влагообмен между собственно грунтовыми водами и зоной аэрации не изменяется. Поэтому испарение в лизиметре с переменным уровнем в период сохранения инфильтрационных вод меньше, чем при постоянном. Необходимо отметить, что суммарное испарение в лизиметрах с переменным уровнем выше, чем в установках с постоянным потому, что в первом случае в невегетационный период и в начале вегетации мощность зоны аэрации меньше, хотя в середине вегетационного периода и в конце, в межполивные периоды грунтовые воды в обеих разновидностях лизиметров в среднем находятся в одинаковом положении.

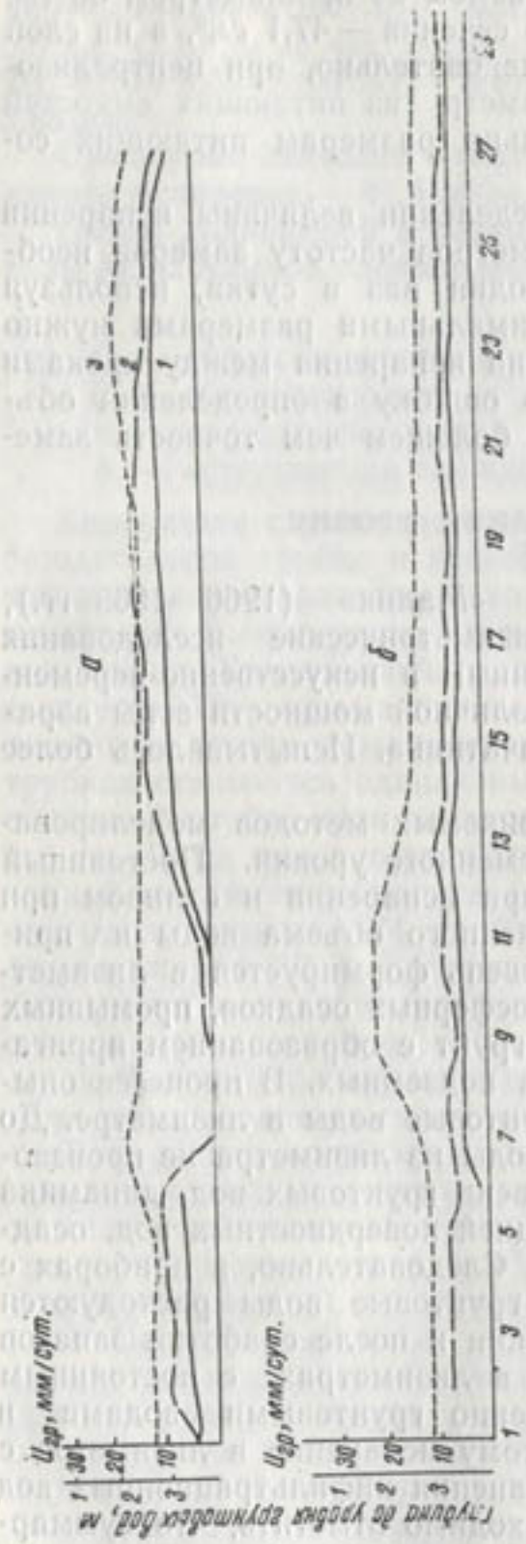


Рис. 11. Совмещенные графики режима уровня и испарения грунтовых вод за август (*а*) и сентябрь (*б*) 1968 г. по данным лизиметров с постоянным (*1*) и переменным (*2*) уровнем; *3*—уровень скважины № 1.

Способ моделирования искусственно-переменного уровня грунтовых вод, практикуемый на водно-балансовых участках гидрогеологических станций, не соответствует названию, так как вместо создания искусственно-переменного уровня в соответствии с режимом грунтовых вод на окружающем поле в лизиметрах производятся наблюдения за сработкой ирригационно-грунтовых вод. В период сработки фильтрационных вод из зоны аэрации лизиметр действует как прибор с переменным (непрерывно снижающимся) уровнем, после сработки ирригационно-грунтовых вод экспериментируемая установка действует как лизиметр с постоянным уровнем. Искусственно-переменный принцип перестает действовать. В лизиметрах с естественно-переменным уровнем, судя по опыту работ Бухарской и Голодностепской гидрогеологических станций, этот режим не создается. Здесь исследователь имеет искусственно-переменный уровень грунтовых вод, так как горизонт воды поддерживается доливом или отливом без применения автономных поплавковых систем, обеспечивающих синхронность с динамикой уровня. Ручным доливом и отливом воды, производимым обычно 2—3 раза в день, трудно создать оптимальный естественно-переменный уровень, экспериментируемый режим в лизиметре существенно отличается от действительного.

По результатам многолетних исследований в Бухарском оазисе, в лизиметрах с постоянным и искусственно-переменным уровнем составлены совмещенные графики (рис. 11) режима испаре-

Таблица 33

Сравнительные данные об испарении грунтовых вод в лизиметрах с хлопчатником при постоянном и переменном уровне (опытно-балансовый участок „Малик", 1967 г.)

Уровень	Глубина до воды, м	Месяцы												Период		Сумма за год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	невегетационный	вегетационный	
Постоянный*	1,0	6,97	0,0	0,0	3,7	14 0	32,45	163,9	94,8	60,0	49,0	2,2	2,6	60,77	368,85	429,62
Переменный**	1,0	2,48	0,0	2,87	2,87	3,32	5,04	167,9	181,0	54,0	13,0	1,6	1,9	21,85	415,53	437,38
* / **		2,8		1,3		3,5	6,5	1,0	0,5	1,7	3,8	1,4	1,3	2,7	0,9	1,0
Постоянный*	1,5	5,79	0,0	0,0	0,9	19,27	20,75	106,8	145,6	52,0	51,0	7,1	3,0	66,89	345,82	412,71
Переменный**	1,5	10,55	1,68	2,1	2,87	1,57	5,99	9,7	57,4	16,0	4,4	3,3	3,2	25,23	93,53	118,76
* / **		0,5			0,3	12,0	3,4	1,1	2,5	3,2	11,6	2,1	0,9	2,7	3,7	3,4
Постоянный*	2,0	4,83	0,0	0,0	0 0	3,73	8,73	17,9	37,6	10,0	16,0	1,6	2,3	24,73	77,96	102,69
Переменный**	2,0	0,0	0,8	1,54	1,75	2,04	2,94	10,2	28,2	2,4	12,0	8,3	1,7	24,34	47,53	71,87
* / **		1,8					3,0	1,7	1,5	4,1	1,3	0,2	1,3	1,0	1,6	1,4

ния. Так, испарение грунтовых вод в условиях искусственно-переменного уровня благодаря наличию инфильтрационных вод над грунтовыми меньше. Разница в абсолютных величинах по месячным данным за невегетационный период составляет 0,2—15,7 *мм*, в вегетационный — 18,0—40,1 *мм*. Соотношение величин испарения грунтовых вод в указанных категориях лизиметров 1,1—2,1; за невегетационный период — 1,1, вегетационный — 2,1, по сумме за год — 1,9. При малой мощности зоны аэрации соотношение величин испарения характеризуется небольшими коэффициентами, среднемноголетние значения которых колеблются от 1,3 до 1,5. С увеличением глубины залегания грунтовых вод оно повышается от 1,3 до 2,4. Видимо, это можно объяснить особенностью распространения и расходования, а также относительно большим временем сохранения инфильтрационных вод над зеркалом грунтовых и как следствие этого — относительно большее испарение при меньшей мощности зоны аэрации.

Превышение испарения грунтовых вод в лизиметрах с постоянным зеркалом воды по сравнению с переменным устанавливается и по ежесуточным замерам. Ход режима испарения в основном повторяет режим уровня грунтовых вод. Разница в абсолютных величинах испарения за август и сентябрь 1968 г. по приборам с постоянным и переменным уровнем колеблется от 2 до 6 *мм*. Наибольшие отклонения наблюдаются в предполивной период и в течение нескольких дней после полива.

Таким образом, динамика зеркала грунтовых вод в лизиметре определенно влияет на ход испарения. В приборах с естественно-переменным уровнем испарение грунтовых вод в период инфильтрации уменьшается (табл. 33). К сожалению, кратковременность опытов не позволяет получить достоверные характеристики. По материалам одного года исследований можно заключить, что испарение грунтовых вод в лизиметрах с постоянным уровнем выше, чем в приборах с переменным. Соотношение величин испарения составляет за невегетационный период 1,0, вегетацию — 1,6, сумма за год — 1,4. Наибольшие отклонения наблюдаются в августе, начале и конце вегетационного периода. В целом выводы, сделанные по материалам Бухарского оазиса, аналогичны и для Голодной степи.

ВЛИЯНИЕ ИНФИЛЬТРАЦИИ НА ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ

В условиях орошаемого земледелия, искусственного восполнения запасов почвенной влаги, интенсивность испарения зависит от инфильтрационных вод в зоне аэрации. Даже в условиях максимального испарения с проникновением инфильтрационных вод расход влаги с зеркала грунтовых вод прекращается. Орошение может существенно влиять на режим испарения.

Рассмотрим материалы экспериментальных наблюдений на опытно-балансовом участке «Малик» (рис. 12). Кривая зависимости на графике (рис. 12) показывает, что влияние инфильтрационного питания грунтовых вод на испарение с глубиной уменьшается. При мощности зоны аэрации 1,0 *м* инфильтрационное питание грунтовых вод в апреле составило 50 *мм*, в октябре — 3 *мм*, испарение увеличилось с 9 до 77 *мм*.

За это время абсолютная величина инфильтрационных вод при глубине 1,5 *м* изменяется от 13,0 до 32,0 *мм*, испарение — от 66,0 до 8,0 *мм*; при глубине 2,0 *м* — соответственно от 60,0 до 7,0 *мм* и от 2,0 до 39,0 *мм*.

Таким образом, в условиях насыщения грунтов подземные воды питаются за счет инфильтрации. Недостаточное насыщение,

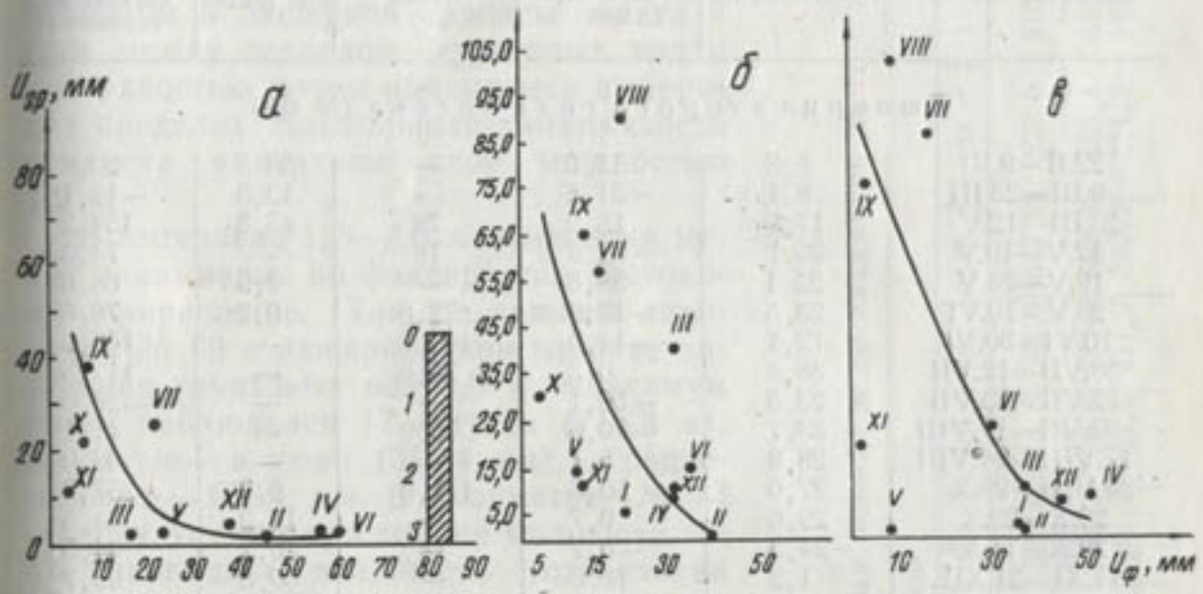


Рис. 12. Зависимость испарения грунтовых вод от инфильтрационного питания:

а — при мощности зоны аэрации 2,0 *м*; *б* — 1,5 *м*; *в* — 1,0 *м*; римские цифры — месяцы.

что наблюдается обычно при больших мощностях зоны аэрации, приводит к частичному или полному прекращению испарения. Максимальным значениям инфильтрации соответствует низкая интенсивность расхода влаги с уровня грунтовых вод.

ВЛИЯНИЕ ЗАПАСОВ ВЛАГИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ НА ИСПАРЕНИЕ

В настоящее время суммарное испарение и испарение грунтовых вод определяется по балансу влаги в лизиметре без учета динамики влажности грунтов зоны аэрации, что, между тем, существенно влияет на формирование процесса испарения. Так, по данным Кургантюбинской гидрогеологической партией, в лизиметрах, установленных на хлопковом поле, в течение всего года месячная сумма испарения грунтовых вод колеблется в пределах 1,2—36,4 *мм*.

С. И. Харченко (1968) установил, что пренебрежение изменением влагозапаса в лизиметре ведет к грубейшим ошибкам. Они зависят от промежутка времени, за который вычисляется испарение, и мощности зоны аэрации. Но суммарное испарение не всегда характеризуется положительной величиной, т. е. существует и отрицательное испарение — конденсация влаги в зоне аэрации (табл. 34), которая в марте составляет 11,1 *мм*, а в июле — 26,6 *мм* (лизиметры с глубиной залегания грунтовых вод 2,5 *м* и люцерной второго года посева). Конденсация влаги в лизиметрах с хлопчатником на глубине 3,0 *м* в июле составила 5,1 *мм*, октябре — 16,6 *мм*, что привело к увеличению влажности грунтов.

Таблица 34

Исходные данные и величина суммарного испарения грунтовых вод по результатам лизиметрических исследований Курган-Тюбинского участка 1967 г. (мощность зоны аэрации 3 *м*)

Расчетный период	Испарение, *мм*	Расход влаги из зоны аэрации	Полив	Атмосферные осадки	Суммарное испарение с дневной поверхности
Люцерна второго года посева (№ 69)					
22.II–9.III	5,8	11,5	—	33,5	50,8
9.III–23.III	8,1	−31,5	—	12,3	−11,1
23.III–12.V	17,7	15,2	78	43,3	154,2
12.V–19.V	36,1	−32,6	78	-	74,5
19.V–28.V	22,1	38,6	—	7,9	68,6
28.V–10.VI	23,5	−17,9	72,8	0,2	78,6
10.VI–30.VI	12,1	−14,8	109,2	—	106,5
30.VII–12.VII	36,4	0,5	25,6	—	117,5
12.VII–23.VII	23,5	−50,1	—	—	−26,6
23.VII–17.VIII	33,7	−70,6	78,0	—	41,1
17.VIII–24.VIII	28,9	5,1	—	—	34,0
24.VIII–29.X	27,0	50,3	171,6	9,0	257,9
20.X–29.X	29,6	0,7	—	14,2	44,5
29.X–11.XI	24,5	−0,7	—	20,2	44,0
11.XI–21.XII	1,2	18,0	—	50,5	69,7
Хлопчатник (№ 73)					
5.II–22.II	11,5	30,5	—	34,3	76,3
3.V–26.V	—	19,4	—	17,5	36,9
29.V–8.VI	—	19,2	39,0	0,2	19,4
10.VI–28.VI	—	16,2	78,0	—	34,2
1.VII–10.VII	—	−5,0	—	—	−5,1
10.VII–21.VII	—	21,0	—	—	21,0
21.VII–2.VIII	—	−30,3	78,0	—	45,0
2.VIII–3.IX	—	−14,0	156,0	—	142,0
3.IX–21.X	—	43,7	—	8,7	52,4
29.X–12.XI	9,4	−56,5	—	33,5	−14,6
12.XI–29.XI	9,4	28,4	—	42,0	79,8

А. С. Субботин (1976) отмечает, что опыт расчета испарения по сокращенному уравнению в лизиметрах, где вообще не производится измерения влажности грунтов, является недопустимым. Пренебрежение изменением влагозапасов ведет к грубейшим ошибкам в определении, которые увеличиваются с уменьшением промежутка времени и большой глубиной монолита.

По данным лизиметров в комплексе тепло-влажностных наблюдений с хлопчатником и люцерной запасы влаги в слое между зеркалом грунтовых вод и поверхностью почвы изменяются в широких пределах. Наибольшая динамичность отмечена в верхнем слое мощностью 1,2 *м*.

В интервале 1,2—3,0 *м* изменения менее динамичны, но фиксируется постоянное приращение. Так, по данным лизиметра № 69 с люцерной при глубине залегания грунтовых вод 3,0 *м*, максимум влаги наблюдался 17 августа (712,8 *м*), минимум — в июне (511,4 *мм*), среднегодовая — 612,1 *мм*. В лизиметре № 73 с хлопчатником при той же мощности зоны наивысшая влажность установлена 23 августа (885,4 *мм*), наименьшая — 23 марта (552,4 *мм*), среднегодовая — 789,7 *мм* (табл. 36).

В условиях выращивания люцерны второго года посева (табл. 35) изменение запасов влаги колеблется от —70,6 *мм* до +50,3 *мм*. При суммарном испарении 1105,2 *мм* с 22. II по 21. XII 67 г. и расходе грунтовых вод 330,2 *мм* с посевом и инфильтрацией влажность в зоне аэрации увеличилась на 85,3 *мм*. В условиях выращивания хлопчатника с 5. II по 22. XII 1967 г. при суммарном испарении 547,3 *мм*, расходе грунтовых вод 30,3 *мм* с учетом инфильтрации поливных вод и атмосферных осадков запасы влаги грунтов в зоне аэрации уменьшились на 52,5 *мм*.

Непостоянство запасов влаги отмечено и по годам (табл. 35). Поэтому прак-

Таблица 35

Данные о запасах влаги (*мм*) в зоне аэрации 0,0—2,5 *м* по лизиметру № 71

Год	Месяцы												Средне-годовой	Растительный покров
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
1969	594,7	606,9	614,8	588,0	608,1	603,4	539,6	513,8	598,4	547,9	527,0	510,8	571,12	Хлопчатник
1970	—	505,5	—	—	539,5	580,3	608,0	—	—	—	—	—	—	То же
1971	546,1	537,4	516,7	501,9	601,0	618,2	648,7	620,7	633,2	652,3	655,4	640,4	597,67	Люцерна
1972	621,5	618,3	611,6	535,9	467,8	455,9	447,2	464,8	411,2	540,2	511,3	549,8	519,6	Люцерна второго года посева

тику расчета испарения по балансу влаги в лизиметре без учета изменения влажности грунтов в зоне аэрации нужно считать в методическом отношении неверной.

Влажность в зоне аэрации формируется под влиянием температуры воздуха, почвы, испарения грунтовых вод, поливов, атмосферных осадков, промывок и, конечно, суммарного испарения. На рис. 13 изображен ход процесса по сезонам года в условиях выращивания хлопчатника и люцерны второго года посева по данным Кургантюбинской гидрогеологической партии. Здесь суммарное испарение при определенной связи с температурой воздуха и почвы прямо пропорционально запасам влаги.

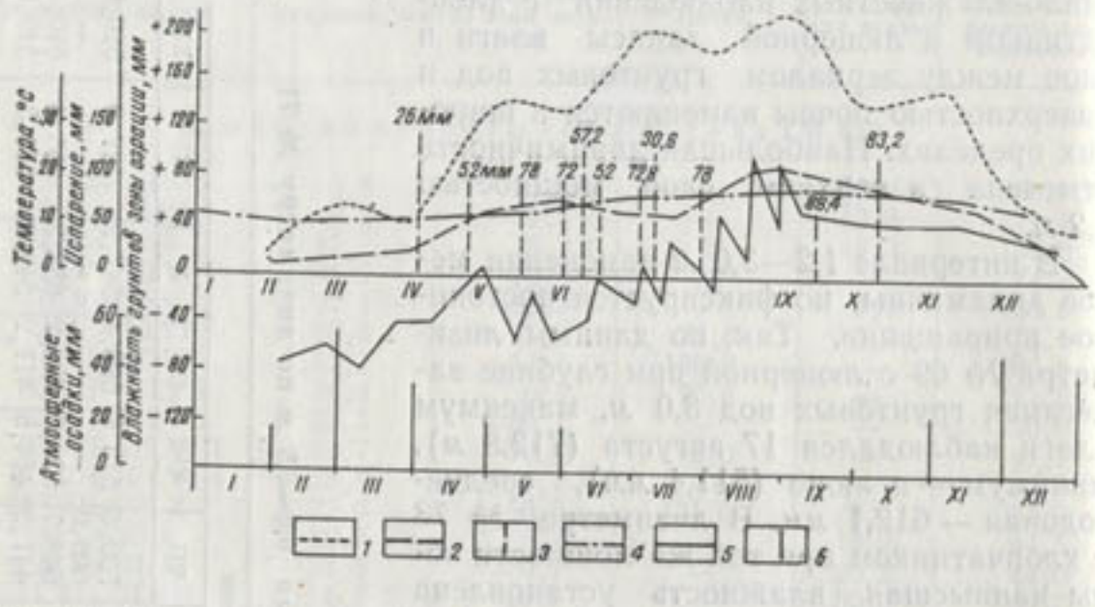


Рис. 13. Совмещенные графики режима испарения и влияющих факторов в условиях произрастания люцерны второго года посева за 1971 г.:

1 — суммарное испарение; *2* — испарение грунтовых вод; *3* — норма полива; *4* — температура грунта в слое 0—3,0 *м*; *5* — запас влаги грунтов в зоне аэрации; *6* — сумма осадков за месяц.

В вегетационный период при повышенной влажности испарение грунтовых вод из-за компенсации расхода влаги грунтов зоны аэрации может прекращаться. В это время режим влажности определяется режимом орошения и нормой полива под воздействием климатических и дренажных условий. В невегетационный период динамика влажности зависит от режима и величины атмосферных осадков.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВ НА ИСПАРЕНИЕ

Влага с горизонта грунтовых вод к поверхности земли поступает через поровые пространства (в том числе капиллярные), среди которых имеются сквозные и тупиковые. В настоящее время способы определения соотношений тупиковых и сквозных пор не разработаны. Так как основная масса испаряющейся воды передается по капиллярным порам, то испарение грунтовых вод зависит от механических свойств грунта: высоты капиллярного

поднятия и диаметра пор. При этом учитывается, что неоднородность строения зоны аэрации проявляется в скачкообразном изменении влажности на границе раздела слоев. При спаде уровня грунтовых вод в тяжелых грунтах влажность выше, чем в легких, и количество расходуемой воды прямо пропорционально высоте капиллярного поднятия. Так, при одинаковой мощности зоны аэрации в различных грунтах чем выше высота этой каймы, тем больше удельная поверхность капилляров, достигших поверхности земли, а следовательно, интенсивнее испарение. Эта зависимость сохраняется в песках, супесях, суглинках, но в глинах прямого соответствия между капиллярными свойствами и количеством транспортируемой воды не наблюдается. Испарение грунтовых вод в глинистых почвах прямо не связано с капиллярностью. Так, Б. Н. Мичурин (1975) установил, что максимальная высота капиллярного поднятия в природных условиях равна 600 *см*, что способствует развитию капилляров радиусом $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ *см* и удельной поверхностью 2,5 $м^2 \cdot г^{-1}$. В глинистых, раздельно частичных грунтах, с удельной поверхностью более 100 $м^2 \cdot г^{-1}$ скорость капиллярного поднятия очень мала. Предельная же высота меньше, чем в пылеватых грунтах вследствие того, что большая часть пор между глинистыми частицами занята связанной водой, а свободная замкнута пленочными пробками. Это объясняется уменьшением водопроводимости в глинах (рис. 14) и некоторой зависимостью от диаметра капиллярных пор.

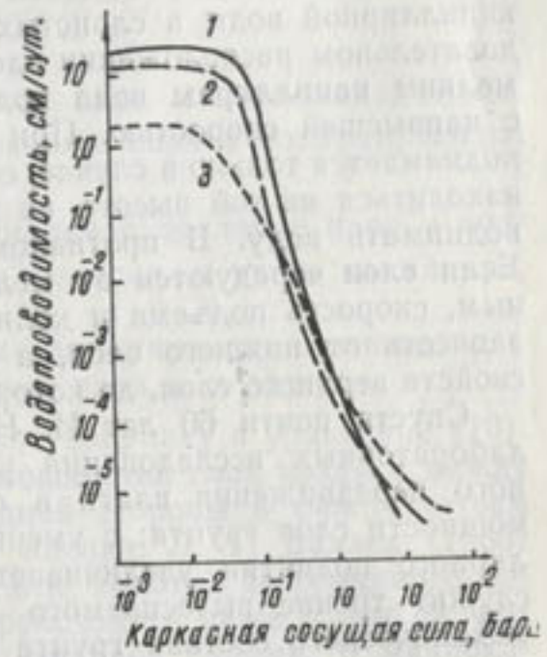


Рис. 14. Водопроводимость трех видов почв в зависимости от каркасной сосущей силы (по К. А. Блэку):

1 — суглинок; *2* — легкий суглинок; *3* — глина.

Согласно Пуазейлу, расход жидкости в капиллярах пропорционален его радиусу — R в четвертой степени и гидростатическому давлению — P, обратно пропорционален длине капилляра — h и вязкости — z:

$$Q = \frac{\pi \cdot P \cdot R^4}{8h \cdot z}, \qquad (9)$$

где $\pi = 3{,}14$.

Количество воды, проходящее сквозь отдельный капилляр, за единицу времени снижается с уменьшением диаметра, что обычно связано с изменением механического состава грунтов.

К. А. Блэк (1973) и некоторые специалисты полагают, что мо-

лекулы воды у стен капилляра удерживаются водородной связью и обладают малой подвижностью.

В монографии «Развитие исследований по теории фильтрации СССР» приведены следующие высказывания: «...глина состоит из тонких чешуек, обладающих способностью притягивать полярные молекулы воды с образованием сольватных оболочек... В результате в глине вся вода оказывается связанной..».

Еще в 1904 г. П. С. Коссович, изучая особенности распределения капиллярной воды в слоистых грунтах, указывал, что при последовательном расположении слоев снизу вверх от крупных к более мелким капиллярам вода поднимается до максимальной высоты с наивысшей скоростью. При обратном расположении слоев она поднимается только в случае, если более крупные капилляры будут находиться на той высоте, на которую они сами по себе способны поднимать воду. В противном случае вода по ним не пойдет. Если слои чередуются от мелкокапиллярных к крупнокапиллярным, скорость подъема и количество поднимающейся воды будут зависеть от нижнего слоя, а высота подъема — от капиллярных свойств верхнего слоя, до которого поднимается вода.

Спустя почти 60 лет И. Н. Фелициант (1961) на основании лабораторных исследований установил, что скорость капиллярного передвижения влаги в однородных грунтах зависит и от мощности слоя грунта: с уменьшением мощности скорость капиллярного поднятия увеличивается. Причиной этого, по-видимому, служит трение вытесняемого воздуха, которое с утяжелением механического состава грунта и нарастанием его мощности увеличивается. Влияние трения вытесняемого воздуха может иметь существенное значение в слоистых грунтах. Установлено, что на границах разделов между тяжелыми нижними и легкими верхними слоями возникает временная задержка капиллярного поднятия воды, которая также наблюдается в грунтах с утяжеленным механическим составом снизу вверх. Эта задержка увеличивается по мере отдаления раздела от поверхности свободной воды. И. Н. Фелициант (1961) пришел к выводу, что скорость и высота капиллярного поднятия различных растворов как в однородных, так и слоистых грунтах неодинаковы. Это связано с причинами, из которых основными являются: неодинаковая плотность и вязкость растворов и различное влияние растворов на физико-химические свойства пород. Они могут вызвать их коагуляцию, пептизацию, различную степень набухаемости. Раствор NaCl капиллярно передвигается быстрее и на большую высоту, чем раствор Na_2SO_4 и вода. То же самое было отмечено С. П. Краковым, Б. Б. Полыновым и др.

Зависимость типов растворов и степени минерализации от высоты и скорости капиллярного поднятия, по И. Н. Фелицианту (1961), проявляется не только в однородных грунтах, но и слоистых средах. Она сильнее выражена в тяжелых породах, чем в легких и, следовательно, влияние типов раствора связано не только с различной плотностью и вязкостью, но физико-химическими явлениями, возникающими в результате взаимодействия водных масс с твердой фазой грунта.

Для расчета притока парообразной влаги к поверхности почвы по порам обычно используют уравнение Стефана (Дмитриев, 1964), выражающее закономерность испарения влаги из макрокапилляров ($r = 10^{-7}$ *м*), заполненных водой.

$$V_п = \frac{P_б D}{\bar{e}_{пов} \cdot h} \ln \frac{P_б - \bar{e}_{пов}}{P_б - \bar{e}_m}, \qquad (10)$$

где $V_п$ — скорость передвижения пара в капилляре, *м/час*,

$P_б$ — барометрическое давление пара в воздухе, *мм* рт. столба;

$\bar{e}_m$, $\bar{e}_{пов}$ — соответственно парциальное давление пара в воздухе, у поверхности мениска и устья капилляра, *мм* рт. столба;

h — расстояние от устья капилляра до мениска, *м*;

D — коэффициент дифуззии пара в воздухе.

В. К. Лебедева (1949) предложила поправку в уравнение (10), заменив h на $h - h_0$, т. е. разницей мощностей слоя воздуха между мениском и устьем капилляра с одной стороны и между устьем капилляра и верхом пристеночной пленки. Л. Г. Балаев (1963) установил, что из частично (не на всю высоту) заполненного водой капилляра испарение может происходить даже в том случае, если воздух над устьем капилляра насыщен парами. В макрокапилляре вогнутый мениск продолжается в виде тонкой пристеночной, сорбционной пленки воды, способной передвигаться. Эта вода, по С. И. Дмитриеву (1964), кроме того, обладает «меньшей» равновесной упругостью пара над своей поверхностью. При изучении испарения влаги из капилляров необходимо учитывать не только передвижение паров воды за счет диффузии, но и жидкой влаги в направлении устья капилляра через сечение пленки воды, сорбированной на его стенке.

Н. В. Чураев (1963) установил, что когда стенки капилляра над мениском увлажнены водной пленкой значительной длины, доля испарения с поверхности водного мениска незначительна. Общий поток парообразной влаги на уровне устья капилляра формируется главным образом за счет испарения с пристеночной водной пленки.

С. И. Дмитриев (1964) для определения интенсивности испарения из воздушного пространства поровой трубки, внутренние стенки которой покрыты пленкой воды, предложил уравнение (11):

$$Q_{z-0} = -6.08\,\pi D_p\, r_0 \left(\bar{e}_m - \bar{e}_0\right). \qquad (11)$$

Так, если глубина расположения мениска в капилляре больше 1,5 z_0, то испарение из него происходит главным образом с поверхности пристеночной пленки.

При значениях относительной глубины менисков в пределах $0 \leqslant \frac{z}{r_0} < 1{,}5$ доля испарения с мениска в общей величине значительна и ее следует учитывать.

С. И. Дмитриев (1964) делает следующие выводы. Испарение в увлажненной поре — трубке — в основном происходит в зоне, глубина которой не превышает двух радиусов поры. Интенсивность испарения из поры-трубки, внутренние стенки которой покрыты водной пленкой, при прочих равных условиях меньше, чем интенсивность испарения с водной поверхности, численно равной площади поперечного сечения трубки. Это наблюдается несмотря на то, что внутренняя поверхность испарения в водонасыщенной поре больше, чем площадь ее поперечного сечения, и обусловлена малыми градиентами упругости водяного пара.

Д. А. Роуз (1969), изучая взаимосвязь испарения с влагосодержанием почвы, пришел к выводу, что испарение из грунтов, первоначально имеющих равномерное влагосодержание, уменьшается как квадратный корень времени и определяет постоянство профилей влажности относительно $rt^{-\frac{1}{2}}$, где r — глубина залегания грунтовых вод от поверхности земли; t — время.

Для каждой разновидности грунтов они различны.

Х. Калвейт (1953) обнаружил зависимость испарения от глубины залегания грунтовых вод, деятельного покрова, разновидности грунтов и удобренности почв. Согласно его данным, при прочих равных условиях в глинистых супесях, песках, низменных болотах, суглинках, глинах, песчаных глинах испарение составило 490, 465, 504, 498, 490, 470 *мм* соответственно.

Калвейт, ссылаясь на данные Хельригеля, указывает, что удобренная почва, если она не слишком обезвожена, испаряет намного меньше влаги, чем неудобренная.

Анализируя материал по суммарному испарению грунтовых вод в Ферганской котловине, Бухарском и Каракульском оазисах, мы тоже установили определенные зависимости от механического состава грунтов. Видимо, указанная связь — многофакторная, т. е. влияние состава грунтов объясняется не только внутренними причинами, но и воздействием на почву человека (оструктуривание, увлажнение, удобрение) и природы (нагрев под действием солнечной активности). Его влияние зависит от альбедо поверхности, которое изменяется при засолении почв, их промывке, орошении и т. д.

Почво-грунты — зона действия многочисленных естественных электрических полей, обусловленных теллурическими токами, градиентом температур, фотоэффектом, окислительно-восстановительными процессами, трением воздушных потоков о поверхность земли. На капиллярные свойства почв, по данным И. Н. Донецкой (1976), может оказывать определенное влияние «пассивный» электроосмос. «При различных градиентах потенциала поверхностные горизонты грунтов, как правило, заряжены более отрицательно. В этих условиях возникает возможность электроосмотического передвижения влаги в сторону более электроотрицательной зоны». Она делает заключение, что в процессе капиллярного поднятия

Таблица 36

Коэффициенты теплопроводности (по Н. М. Фролову)

Вещество	10^{-3}, *кал/см сек °С*	Порода	10^{-3}, *кал/см сек °С*	Порода	10^{-3}, *кал/см сек °С*
Воздух	0,056	Гранит	6,5	Почва влажная	2,0
Снег свежий	0,3	Песчаник	6,2	Песок (8,3% влажности)	1,4
Вода	1,36	Известняк	4,8	Песок сухой	0,63
Лед	5,7	Глина песчанистая (15% влажности)	2,2	Почва сухая	0,4—0,8

видную роль играют электростатические силы, нейтрализация которых путем «пассивного» электроосмоса позволяет замедлить скорость капиллярного поднятия.

На величину испарения, видимо, влияет теплоемкость почв, которая, по данным Н. М. Фролова (1968), подвергнута значительным изменениям (табл. 36).

ЗАВИСИМОСТЬ ИСПАРЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ОТ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ

Н. Ф. Беспалов (1970), обобщая результаты исследований в Голодной степи, пришел к заключению, что люцерна расходует в два-три раза больше воды, чем хлопчатник, из-за образования большой наземной зеленой массы. Разница в расходе воды особенно большая при глубине грунтовых вод 2—3 *м*. У люцерны корневая система более мощная и проникает глубже, чем у хлопчатника (табл. 37). Н. Ф. Беспалов отмечает, что в результате такого размещения корневой системы расход грунтовых вод под кукурузой меньше, чем под хлопчатником и люцерной. Эта разница еще больше, если сравнивать люцерну второго и третьего года посева.

По данным САНИИРИ, в Приташкентском районе в условиях глубокого залегания грунтовых вод корневая система люцерны обнаружена даже на глубине 18 *м*.

Ю. М. Мирошниченко (1974) считает, что близкие типы растений различаются по величине транспирации. Так, белый саксаул вследствие меньшей голофильности транспирирует примерно в 1,3 раза больше, чем черный.

Результаты опытов Г. И. Афанасик, Н. С. Шабан (1974) и др. показали, что если бы весь корнеобитаемый слой почвы имел высокую влажность, эпюры поглощения воды были бы похожи на эпюру распределения корней в почве. По Аллеру, корневая система представляет собой каналы, а пространство между ними — слабопроницаемые блоки, причем всасывающее давление в каналах определяется сосущей силой растений 1—2 *атм.* У самого корня влажность больше, чем при удалении от него на 1—2 *см.*

Выводы, сделанные различными специалистами об особенностях развития корневой системы растений, распределения всасывающего давления между поровым пространством грунтов и каналами сосущих корней, а также соответствие эпюры поглощения воды распределению влаги подтверждают наши результаты о

Таблица 37

Вес воздушно-сухой корневой массы в конце вегетации и его послойное размещение (по Н. Ф. Беспалову, А. Маханбетову)

Горизонт, *см*	Хлопчатник		Люцерна первого года		Кукуруза	
	г	%	*г*	%	*г*	%
0—20	30,5	58,8	90,9	51,0	102,8	73,8
20—40	8,8	16,9	34,6	20,0	16,9	12,1
40—60	5,4	10,4	17,1	9,6	8,8	6,0
60—80	4,0	7,7	8,6	4,9	5,7	4,2
80—100	1,4	2,7	5,9	3,3	3,6	9,6
100—120	1,0	1,9	4,7	2,7	1,0	0,7
120—140	0,4	0,9	3,4	1,6	0,4	0,3
140—160	0,3	0,5	2,6	1,2	0,0	0,0
160—180	0,1	0,2	1,6	0,9	0,0	0,0
180—200	0,0	0,0	1,1	0,7	0,0	0,0

своеобразном влиянии корневой системы люцерны второго и третьего годов посева на процесс суммарного испарения грунтовых вод (Ганиев, 1974).

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ГРУНТА НА ИСПАРЕНИЕ

С. И. Харченко (1966) выявил, что лизиметры с нарушенной структурой дают заниженные или завышенные на 25—30% и более результаты.

И. Б. Ревут, Г. Л. Масленкова, И. А. Романов (1973) выделяют три случая уменьшения испарения: первый, — если верхнему слою придать структурное состояние из-за некапиллярных промежутков, резко замедляющих поднятие воды; второй,— если изменить фильность поверхностного слоя почвы депрессорами испарения или поверхностно-активными веществами; третий, — если применять химические структурообразователи, создающие комковатую структуру, почва делается гидрофобной. В макроструктурной почве в восходящем движении участвовало менее 10% первоначального содержания подвижной влаги с потерей 14,3% от исходного, т. е. значительно меньше, чем из колонки бесструктурной почвы. На основании этого авторы заключают: «В макроструктурной почве резко замедляется процесс передвижения влаги в зоне иссушения, и испарение приостанавливается на значительно более высоком уровне увлажнения, чем в микроструктурных почвах». Далее отмечается, что гидрофобизация поверхности твердых частиц влияет на процесс испарения в силу увеличения угла смачивания и, следовательно, снижения разности капиллярных давлений в крупных и мелких порах. Это может привести к потере устойчивости пленок и прекращению пленочного движения влаги, сохранится только диффузионная составляющая потока. Структурный слой гидрофобизирующих веществ создает условия для значительного уменьшения испарения почвенной влаги. Приводятся (Ревут, 1973) сведения о 0,44; 3,5-разовом уменьшении испарения в слое с 100%-ным содержанием гидрофобных агрегатов.

Разница в показаниях испарения с оструктуренных и неоструктуренных почв формируется под влиянием влажности. А. И. Архомейко (1950) указывает, что при постоянно убывающей влажности в скорости испарения намечено три периода: первый — при влажности 100—75% от полной влагоемкости испарение из структурной и бесструктурной почвы примерно одинаково, так как его скорость совпадает с испаряемостью; второй — при влажности 70—35% бесструктурная почва испаряет воду с большей скоростью; третий — при влажности почвы меньше 35% структурная почва испаряет больше, но скорость испарения при такой влажности ничтожна.

Следовательно, при анализе материалов экспериментальных наблюдений в связи с влиянием структуры почв на испарение грунтовых вод нужно принимать во внимание состояние влажности в зоне аэрации.

Х. Кохук (1940) указывает, что структура грунта в первоначальном виде не восстанавливается даже через 20—30 лет, что не противоречит нашим выводам о частичном восстановлении структуры грунта в лизиметре за счет ирригационного уплотнения насыпных грунтов. Заключение Х. Кохук, видимо, можно объяснить процессом глинизации почво-грунтов во времени, т. е. увеличением количества глинистых фракций под влиянием природных и ирригационно-хозяйственных факторов.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ИСПАРЕНИЕ

Д. Парланг (1972) отмечает, что уже более полувека (1909 г.) известно влияние растворенного вещества на движение воды в почве. Если в глинистых грунтах скорость движения растворов в связи с ростом концентрации растворенных веществ уменьша-

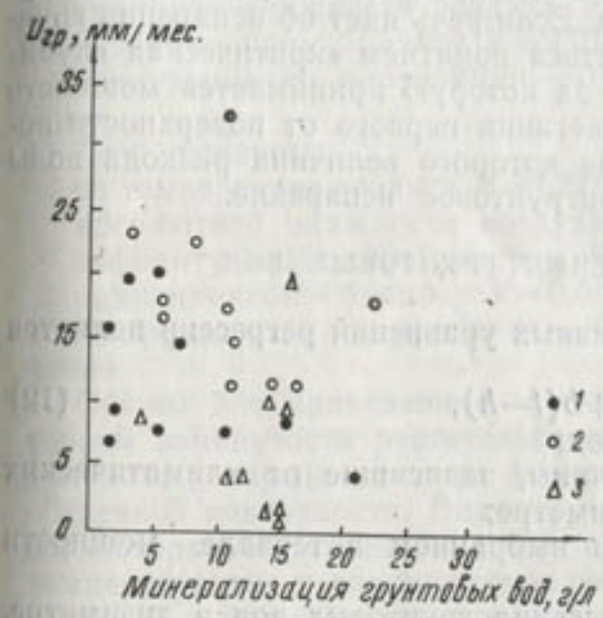
ется (Собольч, Лестак, 1969; Рабочев, 1974; Глобус, Розеншток, 1974; Гольдберг, Баскаков, 1975) проницаемость пород с ростом концентрации растворов NaCl и $CaCl_2$ увеличивается. Если в первом случае причина замедления скорости подъема воды объясняется увеличением вязкости, то во втором — проницаемость увеличивается с разрушением связанной воды глинистых пород и уменьшением ее вязкости. Речь идет о разнохарактерном влиянии минерализации подземных вод в почвенных разностях на процесс испарения грунтовых. Одностороннее утверждение о зависимости скорости движения водных растворов в зоне аэрации от величины плотного остатка неоправданное. Необходимо учитывать особенности грунтов по механическому составу и их водопроводящие свойства.

Зависимость испарения грунтовых вод от минерализации, на которую еще в 1959 г. обратили внимание Д. М. Кац и мы, в 1972 г. подтвердились исследованиями в Чарджоуском оазисе (Рабочев, 1974).

Влияние минерализации на интенсивность испарения грунтовых вод наряду с естественными факторами может определяться биологическими особенностями растений, в частности, развитием зеленой массы и корневой системы через транспирационные и сосущие способности люцерны, хлопчатника, кукурузы, кенафа и др. Влияние агротехнического фактора и орошения на формирование испарения в лизиметрах может быть определяющим, поэтому, учитывая специфику изучаемого вопроса, для анализа мы отобрали сведения о величине испарения грунтовых вод и минерализации по установкам с оголенной почвенной поверхностью. Обрабатывались данные лизиметров площадью 0,1; 0,36; 1,0; 2,0 $м^2$ с грунтом ненарушенной структуры за период наблюдений с 1963 по 1965 г. Связь испарения грунтовых вод с мощностью зоны аэрации выражена четче при близком залегании от поверхности земли — 1,0 *м*.

На графике прослеживается определенная зависимость интенсивности испарения грунтовых вод от площади лизиметров. Показатели установок с размерами 0,1; 0,36; 1,0 $м^2$ расположены соответственно выше точек, характеризующих величину испарения грунтовых вод в лизиметрах с сечением 2,0 $м^2$. Для того, чтобы установить влияние климатического фактора на рассматриваемый процесс, результаты экспериментов обрабатывались отдельно для весеннего, летнего и осеннего периода года. Итоги показали, что весной и осенью установленная тенденция в некоторой степени ослабевает, видимо, образование корки на поверхности почвы увеличивает интенсивность расхода влаги или же температурные градиенты в верхних слоях почвы существенно меняют динамику влажности в зоне аэрации, регулируя приток и расход воды. Четко прослеживается зависимость испарения грунтовых вод на глубине 1,0 *м* от минерализации воды в лизиметре во все периоды года (рис. 15). Разброс точек можно объяснить различными размерами испаряющей поверхности (0,1; 0,36; 2,0 $м^2$), степенью естественного увлажнения и температурными условиями почвы и воздуха за 1963—1965 гг. Необходимо отметить, что при наблюдавшихся крайних значениях плотного остатка от 1,8 до 42,1 *г/л* возможен переход подземных вод из одного типа (сульфатно-гидрокарбонатный) в другой (сульфатно-хлоридный, хлоридный), что может вызвать изменение скоростей передвижения подземных вод в почво-грунтах. К сожалению, из-за отсутствия данных анализ с этой точки зрения не производился.

Зависимость испарения от минерализации грунтовых вод отмечают И. Собольч, Я. Лестак (1969), которые исследовали скорость движения растворов 0,1 нормальной концентрацией и различными типами минерализации. Они выяснили, что вода и раствор $MgCl_2$ поднялись за 11 дней; NaCl — 15;



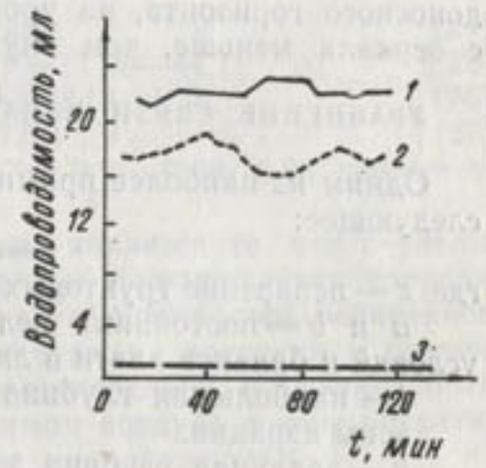


Рис. 15. Зависимость месячных величин испарения грунтовых вод от минерализации:

1—осень; *2*—лето; *3*—весна.

Рис. 16. Водопроводимость песчаных слоев (по И. Собольчу, Я. Лестаку):

1—H_2O; *2*—NaCl; *3*—Na_2CO_3.

Na_2SO_4—18. В течение первых 18 дней раствор Na_2CO_3 поднимался со скоростью 1,6 *см/день*, но затем подъем прекратился. Как отмечает И. Собольч, нейтральные соли натрия незначительно понижают степень водопроницаемости по сравнению с контролем (чистая вода). Проницаемость грунтов с раствором соды практически приближается к нулю, что является результатом засоления почв карбонатом натрия, который настолько изменяет физические свойства почвенных слоев, что они становятся практически непроницаемыми под влиянием коллоидно-химических процессов, пептизации и диспергации почв (рис. 16).

А. М. Глобус, С. К. Розеншток (1974), изучая взаимосвязь между засоленностью почв и передвижением почвенной влаги под действием градиента температуры, пришли к выводу о том, что с увеличением концентрации существенно снижается скорость термопереноса влаги, причем относительная величина этого эффекта уменьшается с увеличением концентрации. Учитывая это заключение и суждения Гольдберг и Баскакова о росте проницаемости глин в основном при минерализации от 3,0 до 30,0 *г/л*, можно утверждать, что зависимость испарения грунтовых вод от минерализации должна быть ближе к криволинейной, чем к прямой. Необходимо отметить, что при прочих равных условиях она определяется высотой капиллярного поднятия или критической глубиной залегания грунтовых вод. Если речь идет об испарении грунтовых вод, то удобно пользоваться понятием «критическая глубина испарения грунтовых вод», за которую принимается мощность зоны аэрации, или глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта, на уровне которого величина расхода воды с зеркала меньше, чем внутригрунтовое испарение.

УРАВНЕНИЕ СВЯЗИ ИСПАРЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Одним из наиболее примитивных уравнений регрессии является следующее:

$$z=a+b(t-h), \qquad (12)$$

где z — испарение грунтовых вод;

a и b — постоянные величины, зависящие от климатических условий и баланса влаги в лизиметре;

t — наибольшая глубина в выбранном интервале мощности зоны аэрации;

h — заданная глубина залегания грунтовых вод в лизиметре.

Для частных случаев предлагаются уравнения (13) и (14), первое для глубины залегания грунтовых вод 1—2 *м*, второе — 2—3 *м*. Значения постоянных a и b в зависимости от деятельного покрова в лизиметре различные.

Приведем уравнения регрессии, по Ч. Д. Диярову, для условий лизиметров с естественной растительностью:

$$z_{1-2}=350{,}6+249{,}8(2-h), \qquad (13)$$

$$z_{2-3}=272{,}6+78.0(3-h) \qquad (14)$$

с хлопчатником:

$$z_{1-2}=305{,}4+254{,}6(2-h), \qquad (15)$$

$$z_{2-3}=189{,}4+116{,}0(3-h). \qquad (16)$$

А. С. Шамуков на основании обобщения материалов водобалансовых исследований в Голодной степи предложил уравнение (17) регрессии:

$$y=ax+b. \qquad (17)$$

По данным лизиметров с болотной поверхностью корреляция между испарением и температурой воздуха выражена уравнением (18):

$$y=4{,}28x-2{,}9, \qquad (18)$$

с абсолютной влажностью воздуха:

$$y=10{,}21x-47{,}14. \qquad (19)$$

Коэффициент корреляции между испарением грунтовых вод и определяющими факторами изменяется от 0,92 до 0,93.

Для условий роста хлопчатника А. С. Шамуков предложил следующие уравнения регрессии:

по температуре воздуха $V=5{,}2t+1{,}1$; (20)

абсолютной влажности воздуха $V=11{,}7e-47{,}5$; (21)

дефициту влажности воздуха $V=5{,}7d+18{,}8$; (22)

радиационному балансу $V=0{,}015B-9{,}96$. (23)

Коэффициенты корреляции — 0,95; 0,95; 0,87; 0,98 соответственно.

Для люцерны:

по температуре воздуха $V=1{,}8t+50{,}9$; (24)

абсолютной влажности воздуха $V=11{,}2e-44{,}1$; (25)

дефициту влажности воздуха $V=8{,}28d+11{,}35$; (26)

радиационному балансу $V=0{,}0157B+1{,}9$. (27)

Коэффициенты корреляции — 0,87; 0,81; 0,68; 0,84 соответственно.

Общим для приведенных уравнений является то, что с увеличением сомкнутости растительного покрова уменьшается корреляция между определяющими факторами и суммарным испарением с дневной поверхности. Видимо, это связано с затенением почвенной поверхности зеленой массой, а следовательно, и своеобразным температурным и влажностным режимом воздуха в зоне развития растений и относительно прохладным микроклиматом.

Наиболее тесная корреляция отмечается между испарением, температурой и абсолютной влажностью воздуха, дефицитом влажности, радиационным балансом (0,81—0,93), тогда как для дефицита влажности она находится в пределах 0,68—0,87.

Р. Ф. Фазылов установил связь между испарением грунтовых вод на единицу урожая от глубины залегания грунтовых вод:

$$Y=\frac{19{,}90}{x}-4{,}30. \qquad (28)$$

Н. Ф. Бондаренко отмечает, что точное решение, определяющее удельный расход на испарение как функцию глубины положения зеркала воды и параметров грунта, весьма сложно.

У. А. Гарднер (1967) для нахождения максимальной скорости испарения при очень высоком всасывающем давлении (капиллярном напоре) у поверхности предложил следующие зависимости:

$$V_{max}=3{,}77\frac{a}{d^{\frac{2}{3}}}, \qquad (29)$$

$$V_{max} = 2{,}46\,\frac{a}{d^2}, \qquad (30)$$

$$V_{max} = 1.76\,\frac{a}{d^3}, \qquad (31)$$

$$V_{max} = 1{,}52\,\frac{a}{d^4}, \qquad (32)$$

где a — экспериментальная постоянная;
d — глубина положения зеркала грунтовых вод.

Д. М. Кац для Средней Азии в условиях суглинистых грунтов предложил зависимость

$$a^{г} = \frac{x}{h^{n}}, \qquad (33)$$

где $a^{г}$ — расход грунтовых вод на испарение и транспирацию за вегетационный период, *мм*;
h — глубина залегания, *м*;
x, n — постоянные коэффициенты, определяемые подбором.

Обобщая данные наблюдений по испарению грунтовых вод, мы пришли к заключению о том, что основными факторами испарения грунтовых вод являются испаряемость, глубина залегания, разновидность грунтов и характер деятельной поверхности. Мы предлагаем следующую эмпирическую зависимость (34) для Кура-Араксинской низменности:

$$U_{г} = \frac{E_0 \cdot a}{2h}, \qquad (34)$$

где $U_{г}$ — испарение, *мм/год*;
E_0 — испаряемость, *мм/год*;
a — доля участия грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности;
h — глубина залегания, или мощность зоны аэрации, *м*.

Значение a — зависит от транспирационных способностей, развития корневой системы растений и вертикальной водопроницаемости грунтов.

Если выразить $\frac{a}{2h}$ через q, то предлагаемую зависимость можно записать:

$$U_{г} = E_0\, q. \qquad (35)$$

С коэффициентом m, учитывающим разновидности грунтов, которыми сложена зона аэрации, указанная зависимость примет вид:

$$U_{г} = E_0\, qm. \qquad (36)$$

При учете влияния деятельной поверхности на испарение грунтовых вод ее можно записать в следующем виде

$$U_{г} = E_0\, qmp, \qquad (37)$$

где p — коэффициент разновидности растений в лизиметрах.

По результатам многолетних исследований установлено, что величина p в орошаемых районах хлопковой зоны СССР изменяется в довольно широких пределах (табл. 18, 23, 24, 28).

Известны зависимости, предложенные Д. М. Кацем:

$$E_{г} = \frac{K}{H_{г}^{1}}, \qquad (38)$$

где $E_{г}$ — испарение грунтовых вод, *мм*;
H — глубина залегания, *м*;
K, п — постоянные, учитывающие культуру и литологию почв.

С. Ф. Аверьяновым:

$$E_{г} = E_0\left(1 - \frac{H_{г}}{H_{кр}}\right)^{n}, \qquad (39)$$

где E_0 — испаряемость;
$H_{г}$ — глубина залегания грунтовых вод;
$H_{кр}$ — критическая глубина.

И. А. Енгулатовым для средних по механическому составу грунтов:

$$B_0 - E_0 \geqslant K \leqslant \frac{1450\,(E_0 - B_0)}{E_0 h^{2,4}}, \qquad (40)$$

где E_0 — испаряемость с поверхности почвы, *мм*;
B_0 — водоподача на поверхность почвы, *м³/га*;
h — глубина грунтовых вод, *м*;
K — разность между испарением и инфильтрационным питанием грунтовых вод, *м³/га* за месяц.

По зависимости (34) рассчитана величина испарения грунтовых вод в лизиметрах с естественной растительностью для условий опытно-балансового участка «Джафархан» Азербайджанской гидрогеологической станции, расположенной в зоне скудного увлажнения. Так, испаряемость $E_0 = 1300$ *мм/год*, доля участия грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности a при мощности зоны аэрации 1,0 *м* составляет 0,66; 1,5—0,53; 2,0—0,48; 2,5—0,32; 3,0 *м* — 0,14 (табл. 38).

В зоне ничтожного увлажнения с высокими испаряемостью и температурой воздуха для расчета испарения грунтовых вод по сравнению с предыдущей предлагается следующая зависимость:

$$U_{г} = E_0 = \frac{a}{2h} + 0{,}1\, hE_0. \qquad (41)$$

Согласно (41), мы рассчитали величину испарения грунтовых вод по данным опытно-балансового участка «Ширабуддин», расположенного в Бухарском оазисе. Исходные данные: $E_0 = 1900$; $a_{0,5} = 0{,}71$; $a_{1,0} = 0{,}65$; $a_{1,5} = 0{,}40$; $a_{2,0} = 0{,}27$; $a_{2,5} = 0{,}18$; $a_{3,0} = 0{,}06$.

Величина испарения грунтовых вод (табл. 38) при мощности зоны аэрации менее чем 2,0 *м* отличается от фактической на небольшую величину (процент отклонения изменяется от 1,2 до 11,3), а выше 2,0 *м* расчетные данные существенно отличаются от фактических.

Поэтому при глубоком залегании грунтовых вод 2,0—3,0 *м* и более от поверхности земли испарение рекомендуется рассчитывать по следующей эмпирической зависимости (42):

$$U_г = \frac{E_0}{2}(a \pm 0{,}01h^2)^*. \qquad (42)$$

Соответственно испарение грунтовых вод составило 256, 228, 142 мм/год при мощности зоны аэрации 2,0, 2,5, 3,0 *м*. Приведенные значения испарения более или менее удовлетворительно схо-

Таблица 38

Результаты сравнительной оценки величин испарения грунтовых вод, полученных экспериментально и расчетным путем для различных зон климатической увлажненности

Данные	Мощность зоны аэрации, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Зона скудного увлажнения, $K<0{,}12-0{,}30$						
Экспериментальные		432	278	186	104	49
Расчетные		420	270	170	96	45
Разница		+12	+8	+16	+8	+4
Зона ничтожного увлажнения, $K<0{,}12$						
Экспериментальные	1460	910	490	355	255	210
Расчетные	1444	807	565	256	228	142
Разница	+16	+103	−75	+99	+27	+68

дятся с результатами, определенными в лизиметрических установках, отклонение рассчитанных от фактических колеблется от 15,3 до 32,4%.

В условиях близкого (1,0—3,0 *м*) залегания грунтовых вод и отсутствия орошения расчет испарения с почвы (E) можно производить по формуле

$$E = \frac{E_0}{1{,}5\,h}.$$

Множитель перед h в зависимости от механического состава грунтов может изменяться от 1,4 до 1,6.

* Для регионов с коэффициентом увлажнения $\leqslant 0{,}12$ справедливо уравнение $U_г = \frac{E_0}{2}(a + 0{,}01h^2)$, для условий 0,12 — 0,30 $U = \frac{E_0}{2}(a - 0{,}01h^2)$.

На орошаемых землях с сельхозкультурами и залеганием уровня грунтовых вод выше критической глубины суммарное испарение с дневной поверхности можно рассчитать по уравнению (42а)

$$E = \frac{U_г \cdot 100}{a}, \qquad (42а)$$

где E — суммарное испарение с орошаемого поля, *мм/год*,
$U_г$ — испарение грунтовых вод, *мм/год*;
a — доля участия грунтовых вод в суммарном испарении с дневной поверхности в условиях произрастания хлопчатника, % (табл. 39).

Эмпирические зависимости (34, 41, 42) — не окончательные и нуждаются в дальнейшем усовершенствовании. Согласно рекомендациям Я. Б. Зельдовича и А. Д. Мышкиса (1972), для подбора формул по экспериментальным данным сначала необходимо за-

Таблица 39

Среднемноголетние (1967—1971 гг.) значения расхода влаги в условиях близкого залегания грунтовых вод, развития хлопчатника, различных по механическому составу грунтов (Ферганская котловина)

Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*	Испарение с зеркала грунтовых вод, *мм/год*			Доля участия грунтовых вод в суммарном испарении, %	Суммарное испарение с дневной поверхности (с зеркала грунтовых вод и из зоны аэрации), *мм/год*		
	пески	супеси	суглинки		пески	супеси	суглинки
0,5	381	630	930	78,2	488	808	1192
1,0	258	441	630	69,2	369	630	900
1,5	168	287	410	48,6	345	586	836
2,0	98	146	240	29,5	310	523	808

даться видом уравнения, а затем определить значения входящих в него постоянных величин. Результаты опытов наносятся на график, затем проводится наиболее правдоподобная кривая. При этом выявляются цифры, в которых можно подозревать большие ошибки. Используются также общие соображения о характере этой зависимости. Ход обработки показан на примере опытно-балансового участка «Бешкентский» Кашкадарьинской гидрогеологической и инженерно-геологической партии. Для этого случая с учетом вышеуказанных рекомендаций заданы два вида формул:

$$Y = a_1 + \frac{b_1}{x}, \qquad (43)$$

$$Y = a_2 x + b_2. \qquad (44)$$

Определение коэффициентов a_1 и b_1, a_2 и b_2, при которых функции наилучшим образом соответствуют опытным данным,

производилось по методу наименьших квадратов. За меру отклонения их от экспериментальных примем

$$\left[Y_i-\left(a_1+\frac{b_1}{x}\right)\right]^2 \tag{45}$$

$$[Y_i-(a_2x+b_2)]^2, \tag{46}$$

чтобы не получить очень малой величины за счет уничтожения отдельных слагаемых разного знака.

В качестве общей ошибки s_1 и s_2 в описании опытных данных формулами (43) и (44) возьмем сумму мер отклонений для всех опытов, т. е.

$$S_i=\sum_{i=1}^{n}\left[Y_i-\left(a_1+\frac{b_1}{x}\right)\right]^2, \tag{47}$$

$$S_1=\sum_{i=1}^{n}[Y_i-(a_2x+b_2]^2, \tag{48}$$

чтобы найти коэффициенты a_1 и b_1, a_2 и b_2, при которых S_1 и S_2 — наименьшие, решим уравнения

$$\frac{\partial S_1}{\partial a_1}=0 \quad \frac{\partial S_1}{\partial b_1}=0, \tag{49}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial a_2}=0 \quad \frac{\partial S_2}{\partial b_2}=0, \tag{50}$$

откуда значения коэффициентов

$$a_1=\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i^2}-\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}-\sum_{i=1}^{n}\frac{Y_i}{x_i}}{n\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}-\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}\right)^2}, \tag{51}$$

$$b_1=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\frac{Y_i}{x_i}-\sum_{i=1}^{n}Y_i\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}}{n\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i^2}-\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}\right)^2}, \tag{52}$$

$$a_2=\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i-nb}{\sum_{i=1}^{n}Y_i}, \tag{53}$$

$$b_2=\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\sum_{i=1}^{n}x_iY_i\sum_{i=1}^{n}x_i}{n\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2}. \tag{54}$$

Вычислив входящие в формулу неизвестные (табл. 40), определим значения коэффициентов. Тогда она (43) примет вид:

$$Y=\frac{773,7}{x}-11,4, \tag{55}$$

$$Y=967,7-261,6\,x. \tag{56}$$

Подставив в выражения (55)—(56) x, получим среднюю расчетную величину испарения ($\bar{Y}_p$) на различных глубинах. Через эти точки на графике проведем кривую (55) и прямую (56) зависимости.

Мерой рассеивания ряда относительно средней расчетной величины является среднее квадратичное отклонение, рассчитываемое по формуле

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y}_p)^2}{n-1}}. \tag{57}$$

Для сопоставления изменчивости рядов с существенно различающимися абсолютными величинами применяется коэффициент вариации

$$Cv_y=\frac{\sigma y}{\bar{Y}_p}\cdot 100\%. \tag{58}$$

Вычисленные по формулам (57) и (58) среднеквадратичные отклонения и коэффициенты вариации для зависимостей (55) и (56) приведены в табл. 41. Их средние значения оказались близкими, но учитывая, что в остальных случаях связь между испарением грунтовых вод и глубиной их залегания выражалась зависимостью

$$Y=a+\frac{в}{x},$$

примем формулу (55).

На основании многолетних лизиметрических исследований на примере Бухарского оазиса и Голодной степи, регионов, расположенных в зонах с коэффициентами климатического увлажнения 0,12 и 0,13—0,30 соответственно, а также Чирчик-Ангренского бассейна и Ферганской котловины с учетом размеров испаряющей поверхности лизиметров, разновидностей деятельного покрова мы попытались установить уравнения связи суммарного испарения грунтовых вод и мощности зоны аэрации.

Во избежание ошибки, на которую могут повлиять индивидуальные особенности интерпретатора, фактический материал обрабатывали способом наименьших квадратов, что дало возможность правильно интерпретировать лизиметрические данные. На рис. 17 показаны совмещенные графики зависимости суммарного испарения грунтовых вод, составленные по среднеарифметическим зна-

Таблица 40

Исходные данные и результаты статистической обработки материалов лизиметрических исследований на опытно-балансовом участке Бешкент

№ п/п	Глубина x_i	Испарение y_i	x_i^2	$\frac{1}{x_i}$	$\frac{1}{x_i^2}$	y_i / x_i	x_i	y_i	$\overline{Y}_i$	$(y_i-\overline{Y}_i)$	(y_i-y_i)	$(y_i-\overline{Y}_i)$	$(y_i-\overline{Y})^2$
1		794,9				791,9	794.9			32,6	1062,8	88,8	7885,4
2		763,6				763,6	763,6			1.3	1,7	62,0	3844,0
3	1,0	728.1	1,0	1.0	1.0	728,1	728,1	762,3	705,1	34.2	1169.6	22.0	484,0
4		719,7				719,7	719,7			42,6	1814.8	13,6	185.0
5		635,5				635,5	635,5			126,8	16078.2	70,6	4984.4
6		613,8				613,8	613,8			118.5	22052,2	92,3	8519,3
7		689,5				460,0	1031,2			185,1	34262,0	114,2	13041,6
8		631,1				420,7	946,6			126.7	16052.9	55,8	3113,6
9	1.5	620,0	2,25	0,67	0,44	413.7	930.0	504,4	575,3	115,6	13363,4	51.7	2992,1
10		566,1				377.4	849,1			61,7	3806,9	9.2	84,6
11		557.0				371,3	835,5			52,6	2766,8	18,3	334,9
12		469.9				231,4	937,8			93,5	8686,2	24.4	595,4
13		400,8				200.4	801,6			25.4	697,0	43.7	3220,7
14	2,0	369,1	4,0	0,5	0,25	184,5	738,2	375.4	441,5	6,3	39.7	75,4	3685.2
15		312,0				171,0	684,0			33,4	1115,6	102,5	10506,2
16		321,3				160,6	642,6			51,1	2926,8	123,2	15178.2
17		333,0				110,0	999,0			86 5	7482,2	150,1	22530,0
18		256,1				85,4	768.3			9,6	92.2	73,2	5358.2
19	3,0	201,6	9,0	0,33	0.11	67,2	604,8	216,5	182,9	44.9	2016.0	18,7	349,7
20		161,6				53,9	481,8			84,9	7208.0	21,3	453,7
21		152,4				50,8	457,2			91,1	8851,8	30,5	930,2
22		106,4				35,5	319,2			140,1	19628,0	76,5	5852,2

чениям и способом наименьших квадратов на основании данных опытно-балансового участка «Малик» в условиях лизиметров с хлопчатником и испаряющей поверхностью 1,44 $м^2$ (табл. 42). Коэффициент вариации, найденный по соотношению среднеквадратичного отклонения к расчетным величинам испарения грунтовых вод, колеблется от 28,1 до 49,8%, составляя в среднем 40,8%.

На основании статистической обработки данных и методом подбора ищем уравнение связи между уровнем грунтовых вод и величиной испарения, которое для условий произрастания хлопчатника в лизиметрах площадью 1,44 $м^2$ с суглинком, коэффициентом климатической увлажненности 0,12—0,30, имеет следующий вид:

Таблица 41

Результаты расчета среднеквадратичных отклонений и коэффициента вариации

Глубина x_i	$\Sigma(Y_i-\overline{Y}_p)^2$	σ_1	C_{v_1}	$\Sigma(Y_2-\overline{Y}_p)^2$	σ_2	C_{v_2}
1,0	42179,3	91,8	12,0	25902,1	72,0	10.2
1,5	70252.0	132,5	26,3	19566,8	69,9	12,1
2,0	13465,3	58,0	15,5	33185,7	91,1	20,5
3,0	45281,2	95,2	38,6	35474,6	84,2	46.0
	$\overline{C}_{v_1}=23,1\%$	$\overline{C}_{v_1}=22,1\%$				

$$Y=\frac{504,6}{x}-5,9, \qquad (59)$$

где Y — суммарное испарение грунтовых вод, *мм/год*,

x — глубина залегания грунтовых вод, *м*.

Этим уравнением описывается график зависимости, полученной по результатам обработки данных методом наименьших квадратов (рис. 18). Связь расчетных величин суммарного испарения грунтовых вод установлена по вышеприведенному уравнению на опытно-балансовом участке «Малик», расположенном в Шурузякском понижении Голодной степи.

Аналогичная обработка выполнена на основании данных опытно-балансового участка Ширабудин в Бухарском оазисе, характеризующих условия произрастания хлопчатника в лизиметрах площадью 0,1 $м^2$, так как материалов по установкам с сечением 1,44 $м^2$ оказалось недостаточно (рис. 19). Для условий Бухарского оазиса с коэффициентом климатической увлажненности менее 0,12 уравнение связи между суммарным испарением грунтовых вод (Y) и мощностью зоны аэрации (x) имеет следующий вид:

$$Y=\frac{1700}{x}-491. \qquad (60)$$

Таблица 42

Исходные данные по опытно-балансовому участку „Малик" и результаты обработки по способу наименьших квадратов

x_i	Y_i	x_i^2	$\frac{1}{x_i}$	$\frac{1}{x_i^2}$	Y_i/x_i	$Y_i - \overline{Y}_p$	$(Y_i - Y_p)^2$	$\frac{Y_{i\,ср}}{\overline{Y}_{p\,ср}}$
1,0	249,5	1,0	1,0	1,0	249,5	—196,1	38455,2	
1,0	265,5	1,0	1,0	1,0	265,5	—180,1	32436,0	
1,0	265,5	1,0	1,0	1,0	265,5	—180,1	32436,0	
1,0	374,6	1,0	1,0	1,0	374,6	—71	5041,0	
1,0	391,9	1,0	1,0	1,0	391,9	—53,7	2883,7	
1,0	423,4	1,0	1,0	1,0	423,4	—22,2	492,8	
1,0	457,4	1,0	1,0	1,0	457,4	11,8	139,2	
1,0	457,4	1,0	1,0	1,0	457,4	11,8	139,2	428,8/445,6
1,0	535,0	1,0	1,0	1,0	535,0	89,4	7992,4	
1,0	540,2	1,0	1,0	1,0	540,2	94,6	8949,2	
1,0	592,6	1,0	1,0	1,0	592,6	147,0	21609,0	
1,0	592,6	1,0	1,0	1,0	592,6	147,0	21609,0	
1,5	100,8	2,25	0,67	0,44	67,26	—176,6	31187,6	
1,5	218,8	2,25	0,67	0,44	145,9	—58,6	3433,9	
1,5	247,3	2,25	0,67	0,44	164,9	—30,1	906,0	
1,5	248,1	2,25	0,67	0,44	165,4	—29,3	858,5	
1,5	294,7	2,25	0,67	0,44	196,5	17,3	299,3	
1,5	350,0	2,25	0,67	0,44	233,3	72,6	5270,8	
1,5	360,8	2,25	0,67	0,44	240,5	83,4	6955,6	
1,5	402,6	2,25	0,67	0,44	268,4	125,2	15675,0	305,9/277,4
1,5	403,6	2,25	0,67	0,44	269,1	126,2	15926,4	
1,5	432,6	2,25	0,67	0,44	288,4	155,2	24087,0	
2,0	75,2	4,0	0,5	0,25	37,6	—118,1	14030,3	
2,0	84,1	4,0	0,5	0,25	42,0	—109,2	11924,6	
2,0	121,0	4,0	0,5	0,25	60,5	—72,3	5227,3	
2,0	147,0	4,0	0,5	0,25	73,9	—46,3	2143,7	
2,0	149,9	4,0	0,5	0,25	74,9	—43,4	1883,6	
2,0	200,6	4,0	0,5	0,25	100,3	7,3	53,3	
2,0	203,1	4,0	0,5	0,25	101,5	9,8	96,0	
2,0	208,3	4,0	0,5	0,25	104,1	15,0	225,0	
2,0	210,0	4,0	0,5	0,25	105,0	16,7	278,9	
2,0	211,6	4,0	0,5	0,25	105,8	18,3	334,9	
2,0	245,9	4,0	0,5	0,25	122,9	52,6	2766,8	189,5/193,3
2,0	416,6	4,0	0,5	0,25	208,3	23,3	49862,9	
3,0	0,0	9,0	0,33	0,11	0,0	—109,2	11924,6	
3,0	45,0	9,0	0,33	0,11	15,0	—64,2	4121,6	
3,0	67,8	9,0	0,33	0,11	22,6	—41,4	1713,9	
3,0	78,1	9,0	0,33	0,11	26,0	—31,1	967,2	
3,0	100,7	9,0	0,33	0,11	33,6	—8,5	72,2	
3,0	115,4	0,0	0,33	0,11	38,5	6,2	38,4	
3,0	125,9	9,0	0,33	0,11	42,0	16,7	278,9	
3,0	130,0	9,0	0,33	0,11	43,3	20,8	432,6	
3,0	135,0	9,0	0,33	0,11	45,0	25,8	695,6	
3,0	135,0	9,0	0,33	0,11	45,2	25,8	665,6	107,4/109,2
3,0	143,8	9,0	0,33	0,11	47,9	84,6	1197,2	
3,0	1211,8	9,0	0,33	0,11	70,6	102,6	10521,8	
	11768,0		28,7	20,7	8751,7			

Расчетные величины испарения хорошо сходятся с фактическими (рис. 20). В зависимости от ряда наблюдений и качества

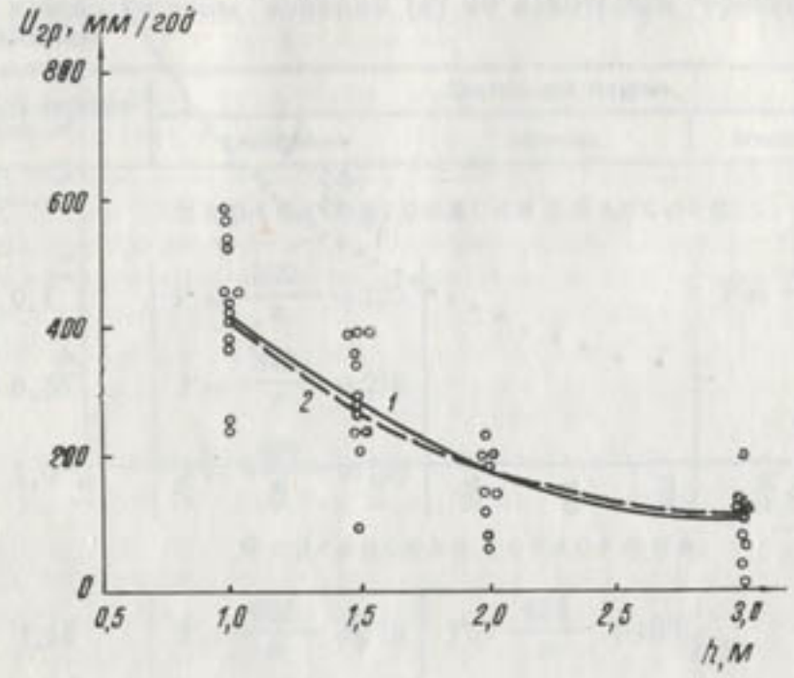


Рис. 17. Совмещенный график зависимости суммарного испарения грунтовых вод, составленный по среднеарифметическим значениям (*1*) и методом наименьших квадратов (*2*).

результатов экспериментальных работ на лизиметрических площадках обрабатывались данные по Чирчик-Ангренскому бассей-

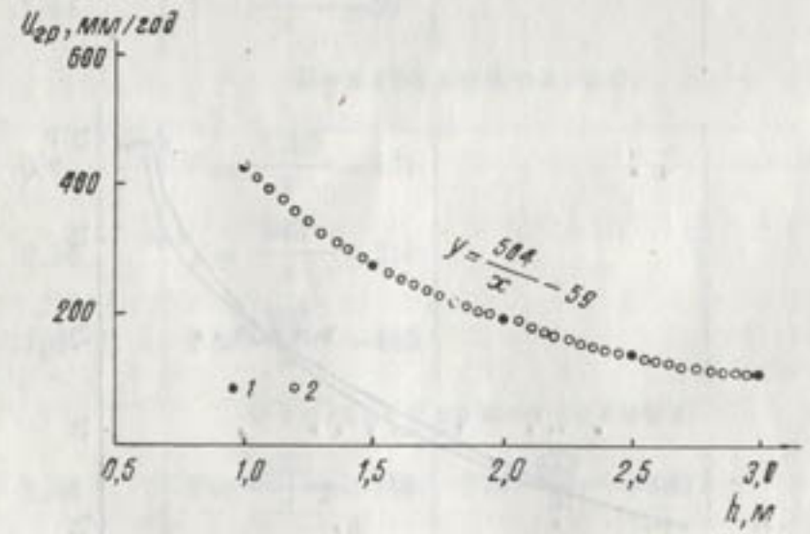


Рис. 18. Связь расчетных (*1*) величин суммарного испарения грунтовых вод с фактическими (*2*).

ну, Ферганской котловине для условий развития хлопчатника, люцерны и оголенной почвенной поверхности в установках площадью

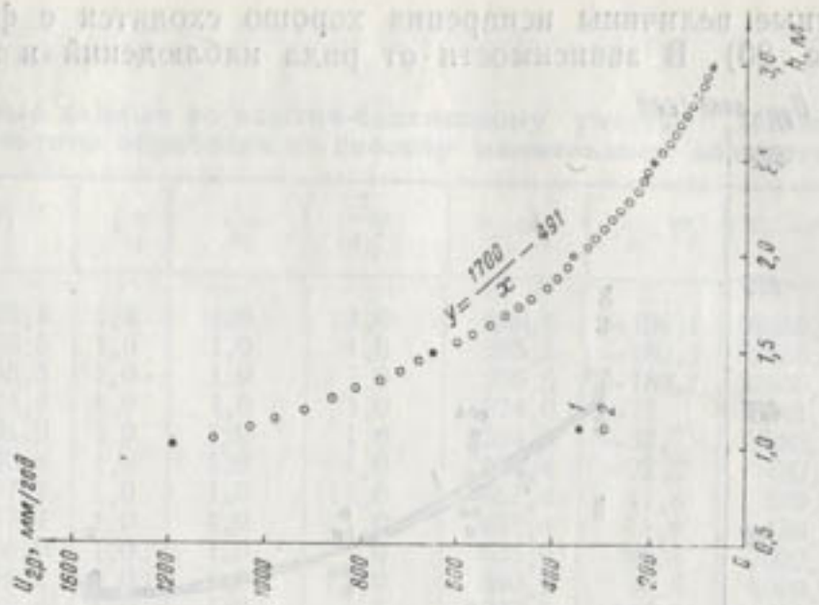


Рис. 19. Совмещенный график зависимости суммарного испарения грунтовых вод, составленный по среднеарифметическим значениям (1) и методом наименьших квадратов (2).

Рис. 20. Связь расчетных (1) величин суммарного испарения грунтовых вод фактическими (2).

Таблица 43

Уравнения связи суммарного испарения грунтовых вод (Y) и мощности зоны аэрации (x) по некоторым орошаемым районам

Площадь лизиметров, м²	Деятельный покров		
	хлопчатник	люцерна	оголенная почва
Чирчик-Ангренский бассейн			
0,1	$Y=\frac{509}{x}+125$		$Y=\frac{462}{x}+45$
0,36	$Y=\frac{343}{x}+218$		
1,0	$Y=\frac{896}{x}-145$		
Ферганская котловина			
1,44	$Y=\frac{637}{x}+118$	$Y=\frac{472}{x}+490$	
Голодная степь			
0,36	$Y=\frac{800}{x}-212$		
1.0	$Y=\frac{519}{x}-70$		
1,44	$Y=\frac{504}{x}-59$		
Бухарский оазис			
0.1	$Y=\frac{1700}{x}-491$		
0,36	$Y=\frac{343}{x}+218$		
1,0	$Y=\frac{896}{x}-145$		
Ферганская котловина			
1,44	$Y=\frac{637}{x}+118$	$Y=\frac{472}{x}+490$	
Голодная степь			
0,36	$Y=\frac{800}{x}-212$		

Продолжение табл. 43

Площадь лизиметров, м²	Деятельный покров		
	хлопчатник	люцерна	оголенная почва
Голодная степь			
1,0	$Y=\frac{519}{x}-70$		
1,44	$Y=\frac{504}{x}-59$		
Бухарский оазис			
0,1	$Y=\frac{1700}{x}-491$		

0,1; 0,36; 1,0; 1,44 *м*² (табл. 43). На основании приведенных зависимостей можно сделать следующие выводы. Связь испарения и глубины залегания грунтовых вод при любом характере деятельного покрова, размерах поперечного сечения лизиметров, разновидностях грунтов, климатической увлажненности регионов описывается следующим уравнением кривой линии:

$$Y=\frac{B}{x}\pm A, \qquad (61)$$

где Y — суммарное испарение грунтовых вод, *мм/год*;
x — глубина залегания, *м*;
A и B — постоянные величины, зависящие от климатических, гидрогеологических, водохозяйственных и других условий.

Сходимость расчетных величин испарения с фактическими удовлетворительная.

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ИСПАРЕНИЮ ГРУНТОВЫХ ВОД

Исследование испарения с помощью математического моделирования позволяет выражать действие различных факторов количественно. Вес каждого из них в формировании испарения различен, поэтому возникает необходимость выбора наиболее существенных.

Процесс испарения с поверхности грунтовых вод смоделирован по следующим отдельным показателям: 1) температуре воздуха X_1, °С; 2) температуре поверхности почвы X_2, °С; 3) инфильтрационному питанию грунтовых вод X_3, *мм*; 4) абсолютной влажности воздуха, *мл. бар*.

Мы использовали результаты лизиметрических наблюдений, проведенных Голодностепской гидрогеологической и инженерно-

геологической партией за 1965—1969 гг. на опытном павильоне совхоза «Малик». В расчет принималась суммарная величина испарения за месяц.

Введены все статистические показатели, которые характеризуют вариационные ряды, обусловливающие величину испарения и влияющих на него факторов (табл. 44).

Установлено, что величина испарения прямо пропорциональна температуре воздуха и поверхности почвы, абсолютной влажности воздуха во все месяцы, кроме июля. В июле она обратно пропорциональна температуре воздуха, так как в это время дефицит влажности грунтов зоны аэрации покрывается поливом.

Таким образом, при максимальном значении температуры воздуха в июле испарение с поверхности грунтовых вод минимальное.

Полученные значения коэффициентов корреляции — $r_{yx_2}=0{,}8$ и $r_{yx_4}=0{,}88$ и сил связи — $\varepsilon_{yx_2}=0{,}35$ и $\varepsilon_{yx_4}=0{,}22$ показывают, что существуют сильные корреляционные зависимости между величиной испарения и температурой поверхности почвы и абсолютной влажностью воздуха за январь, а $r_{yx_1}=0{,}49$, $r_{yx_3}=-0{,}0099$ и $\varepsilon_{yx_1}=0{,}63$, $\varepsilon_{yx_3}=0{,}99$ показывают, что существуют слабые корреляционные зависимости между величиной испарения и температурой воздуха, а также инфильтрационным питанием в это время. Степень тесноты связи отдельных факторов можно установить с помощью подобных данных и для остальных месяцев.

На примере опытного участка «Камангарон» Бухарского оазиса процесс испарения с поверхности грунтовых вод смоделирован по следующим отдельным факторам: 1) температуре воздуха X_1, °С; 2) поверхности почв X_2, °С; 3) зоны аэрации X_3, °С; 4) атмосферным осадкам X_4, *мм*; 5) дефициту влажности воздуха X_5, *мб*; 6) минерализации грунтовых вод X_6, *г/л*.

При моделировании процесса испарения использованы результаты лизиметрических наблюдений, проведенных Бухарской гидрогеологической и инженерно-геологической партией за 1967—1971 гг. на опытном павильоне Камангарон. В расчет принималась суммарная величина испарения с поверхности грунтовых вод по следующим отдельным периодам: невегетационный (январь — I, II, III декады; февраль — I, II, III; март — I, II; ноябрь — I, II, III; декабрь — I, II, III); всходов (март — III декада, апрель — I, II, III); бутонизации (май — I, II, III декады, июнь — I, II); цветения (июнь — III декада, июль — I, II); цветения-созревания (июль — III декада, август — I, II, III, сентябрь — I); созревания (сентябрь — II, III декады); конец вегетационного периода (октябрь — I, II, III декады).

В результате расчетов получены статистические показатели, характеризующие вариационные ряды, обусловливающие величину испарения и влияющих факторов (табл. 45). На основе по-

Таблица 44

Статистические показатели величины испарения грунтовых вод и влияющих факторов (растительный покров—хлопчатник)

Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*	Статистический показатель	Испарение, *мм*	Влияющий фактор: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, *мм*	абсолютная влажность воздуха, *мб*.
			Январь			
1,0	*M*	4,78	0,94	—0,59	2,98	4,28
	σ	0,46	0,22	0,16	0,49	1,24
	r	—	0,49	0,8	—0,0099	0,88
	ε	—	0,63	0,35	0,99	0,22
1,5	*M*	3,24	0,94	—0,59	2,12	4,28
	σ	0,3	0,22	0,16	0,82	1,24
	r	—	0,47	0,77	—0,0083	0,87
	ε	—	0,83	0,40	0,32	0,33
2,0	*M*	25,0	0,94	—0,59	—1,64	4,28
	σ	0,6	0,22	0,16	0,58	1,24
	r	—	0,42	0,74	—0,0048	0,86
	ε	—	0,85	0,45	0,77	0,076
3,0	*M*	0,91	0,94	—0,59	1,32	4,28
	σ	0,32	0,22	0,16	0,53	1,24
	r	—	0,40	0,42	—0,0039	0,84
	ε	—	0,86	0,82	0,85	0,11
1,0	*M*	3,94	1,29	1,94	52,22	4,74
	σ	3,36	2,70	2,81	14,63	1,71
	r		0,99	0,99	—0,45	0,89
	ε		0,069	0,025	0,79	0,29
1,5	*M*	2,79	1,29	1,94	36,99	4,74
	σ	1,42	2,70	2,81	14,19	1,71
	r		0,98	0,96	—0,38	0,88
	ε		0,036	0,004	0,86	0,23
			Февраль			
2,0	*M*	2,24	1,29	1,94	26,54	4,74
	σ	0,89	2,70	2,81	11,24	1,71
	r		0,85	0,93	—0,32	0,87
	ε		0,28	0,13	0,82	0,25

Продолжение табл. 44

Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*	Статистический показатель	Испарение, *мм*	Влияющий фактор: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, *мм*	абсолютная влажность воздуха, *мб*.
3,0	*M*	1,56	1,29	1,94	13,54	4,74
	σ	0,51	2,70	2,81	8,01	1,71
	r		0,73	0,90	—0,27	0,82
	ε		0,34	0,035	0,93	0,15
1,0	*M*	3,98	8,08	8,80	28,64	7,54
	σ	1,78	1,49	1,64	10,37	0,84
	r		0,51	0,79	—0,94	0,18
	ε		0,86	0,38	0,11	0,97
			Март			
1,5	*M*		8,08	8,80	18,70	7,54
	σ	2,70	1,49	1,64	4,62	0,84
	r	0,70	0,49	0,78	—0,87	1,13
	ε		0,76	0,39	0,25	0,98
2,0	*M*	2,06	8,08	8,80	16,14	7,54
	σ	0,53	14,9	1,64	3,26	0,84
	r		0,47	0,76	—0,85	0,11
	ε		0,78	0,42	0,28	0,99
3,0	*M*	1,62	8,08	8,80	8,99	7,54
	σ	0,49	1,49	1,64	4,07	0,84
	r		0,45	0,72	—0,78	0 088
	ε		0,78	0,43	0,39	0,99
1,0	*M*	5,36	14,86	17,60	13,20	10,29
	σ	3,01	1,08	1,52	4,69	1,17
	r		0,51	0,98	—0,89	0,47
	ε		0,74	0,038	0,31	0,86
1,5	*M*	3,62	14,86	17,60	7,48	10,29
	σ	2,45	1,08	1, 2	3,79	1,17
	r		0,42	0,98	—0,75	0,41
	ε		0,82	0,044	0,33	0,83
			Апрель			
2,0	*M*	2,44	14,96	17,60	5,82	10,29
	σ	1,05	1,08	1,52	3,25	1,17
	r		0,40	0,97	—0,70	0,38
	ε		0,77	0,024	0,50	0,85

Продолжение табл. 44

Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*	Статистический показатель	Испарение, *мм*	Влияющий фактор: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, *мм*	абсолютная влажность воздуха, *мб*.
3,0	*M*	1,64	14.86	17,60	2,22	10.29
	σ	0,43	1.08	1,51	1,32	11,7
	r		0,35	0,96	−0,68	0,13
	ε		0,44	0,087	0,54	0,98
			Май			
1,0	*M*	15,40	20,70	25,20	14,74	12,20
	σ	2,72	1,11	3.27	4,34	1,81
	r		0,58	0,68	−0,76	0,19
	ε		0,66	0,56	0,42	0.96
1,5	*M*	6.90	20,70	25.20	8,54	12.20
	σ	2,47	1,11	3,27	3,52	1.82
	r		0,52	0,57	−0,71	0,17
	ε		0,61	0,36	0,27	0,99
2,0	*M*	2,99	20,70	25,20	5,74	12,20
	σ	1,11	1,11	3.27	2,82	1,82
	r		0,40	0,56	−0,69	0,15
	ε		0,84	0,69	0,51	0,97
3,0	*M*	1,82	20,70	25.20	2,80	12,20
	σ	0.30	1,11	3,27	0.94	1,82
	r		0,34	0,32	−0,62	0.13
	ε		0,88	0,89	0,49	0,85
1,0	*M*	21.72	25.72	32,20	16,68	15.10
	σ	7,06	0.98	1,30	4,98	1,62
	r		0,73	0,88	−0,95	0.42
	ε		0,53	0,22	0,29	0,90
			Июнь			
1,5	*M*	13.76	25,72	32,20	9,06	15.10
	σ	4.68	0.98	1.30	4,90	1,62
	r		0.71	0,86	−0,92	0,39
	ε		0,49	0,26	0,19	0,89
2,0	*M*	6,99	25,72	32,20	7,66	15,10
	σ	3,27	0,98	1,30	3,45	1,62
	r		0,69	0,81	−0,91	0,36
	ε		0,53	0,27	0,14	0,87

Продолжение табл. 44

Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*	Статистический показатель	Испарение, *мм*	Влияющий фактор: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, *мм*	абсолютная влажность воздуха, *мб*.
3,0	*M*	1,98	25,72	32.20	3,26	15,10
	σ	0,65	0,98	1.30	1,95	1,62
	r		0,58	0,68	−0,86	0,27
	ε		0,66	0,54	0,083	0,68
			Июль			
1,0	*M*	67,46	26,58	33,80	25,32	16,69
	σ	16,71	0,62	1,79	4.86	1,87
	r		−0,57	0.78	−0,98	0,47
	ε		0,67	0,39	0,044	0,78
1,5	*M*	38,22	26,57	33,80	18,72	16,69
	σ	13,80	0,62	1,79	3.51	1,87
	r		−0.48	0,67	−0.58	0,27
	ε		0,77	0.55	0,67	0,93
2,0	*M*	16,10	26,58	33 80	12,52	16,69
	σ	7.47	0.62	1,79	3,14	1,87
	r		0,42	−0,36	0,18	0,18
	ε		0.93	0.82	0.87	0,99
3,0	*M*	6,08	26.58	33.80	7,16	16,69
	σ	2,49	0.62	1,79	2,86	1,87
	r		−0,32	0.35	−0.28	0,17
	ε		0.89	0,43	0,89	0.92
1,0	*M*	94.68	24,09	30,99	7,00	16,32
	σ	27,37	0.86	1,22	2.90	1,29
	r		0.78	0.83	−0,73	0,49
	ε		0.47	0.30	0,46	0,76
1,5	*M*	62,72	24.09	30,99	3,64	16,32
	σ	19,73	0.86	1,22	2,35	1,29
	r		0,74	0.80	−0.71	0,48
	ε		0,45	0,29	0,30	0.77
			Август			
2,0	*M*	34,16	24,09	30,99	2,16	16,32
	σ	12,69	0,86	1,22	1.01	1,29
	r		0,66	0,79	−0,65	0,40
	ε		0,58	0,38	0,28	0,84

Продолжение табл. 44

Глубина залегания уровня грунтовых вод, м	Статистический показатель	Испарение, мм	Влияющий фактор: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, мм	абсолютная влажность воздуха, мб
3,0	M	8,88	24,09	30,99	1,48	13,32
	σ	3,08	0,86	1,22	0,59	1,29
	r		0,65	0,70	−0,63	0,38
	ε		0,27	0,19	0,13	0,66
1,0	M	59,46	18,72	23,19	2,86	11,69
	σ	9,71	0,68	0,84	1,39	1,12
	r		0,73	0,19	−0,93	0,78
	ε		0,46	0,96	0,13	0,39
1,5	M	41,32	18,72	23,19	1,68	11,69
	σ	9,42	0,68	0,84	0,75	1,12
	r		0,70	0,12	0,90	0,76
	ε		0,50	0,99	0,081	0,39
Сентябрь						
2,0	M	25,72	18,72	23,19	1,36	11,69
	σ	9,04	0,68	0,84	0,55	1,12
	r		0,64	0,11	−0,88	0,74
	ε		0,59	0,99	0,046	0,29
3,0	M	12,98	18,72	23,19	0,60	11,69
	σ	2,62	0,68	0,84	0,22	1,12
	r		0,62	0,04	−0,87	0,64
	ε		0,33	0,88	0,068	0,30
1,0	M	37,20	12,52	13,80	11,82	9,19
	σ	4,62	0,72	0,84	3,67	1,15
	r		0,94	0,95	−0,24	0,28
	ε		0,12	0,096	0,94	0,72
1,5	M	19,18	12,52	13,80	5,68	9,19
	σ	5,23	0,72	0,84	2,32	1,15
	r		0,92	0,91	−0,23	0,29
	ε		0,10	0,17	0,96	0,79
Октябрь						
2,0	M	10,10	12,52	13,80	3,06	9,19
	σ	3,84	0,72	0,84	1,33	1,15
	r		0,89	0,90	−0,20	0,19
	ε		0,20	0,18	0,99	0,86

Продолжение табл. 44

Глубина залегания уровня грунтовых вод, м	Статистический показатель	Испарение, мм	Влияющий фактор: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, мм	абсолютная влажность воздуха, мб
3,0	M	5,80	12,72	13,80	1,62	9,19
	σ	1,77	0,72	0,84	0,39	1,15
	r		0,79	0,56	−0,15	0,17
	ε		0,38	0,69	0,98	0,87
1,0	M	16,64	6,14	6,79	7,02	7,24
	σ	3,87	1,59	3,32	3,31	1,37
	r		0,96	0,95	−0,97	0,67
	ε		0,36	0,35	0,079	0,47
1,5	M	10,80	6,14	6,79	4,58	7,24
	σ	3,80	1,59	1,30	2,13	1,34
	r		0,95	0,94	−0,96	0,64
	ε		0,12	0,11	0,036	0,69
2,0	M	5,68	6,14	6,79	3,5	7,24
	σ	2,35	1,59	1,30	1,55	1,37
	r		0,94	0,94	−0,95	0,61
	ε		0,12	0,12	0,091	0,62
3,0	M	2,88	6,14	6,79	1,62	7,24
	σ	0,79	1,59	1,30	0,38	1,37
	r		0,87	0,85	−0,91	0,52
	ε		0,24	0,28	0,17	0,73
1,0	M	9,02	2,58	2,39	17,64	5,90
	σ	2,43	1,12	1,14	3,09	1,04
	r		0,46	0,44	−0,88	0,53
	ε		0,89	0,90	0,23	0,72
1,5	M	3,58	2,58	2,39	11,26	4,90
	σ	1,82	1,12	1,14	3,64	1,04
	r		0,37	0,43	−0,84	0,50
	ε		0,86	0,91	0,32	0,74
2,0	M	1,91	2,58	2,39	5,45	5,90
	σ	0,40	1,12	1,14	2,26	1,04
	r		0,36	0,96	−0,77	0,49
	ε		0,89	0,93	0,34	0,76

Продолжение табл. 44

Глубина залегания уровня грунтовых вод, *м*	Статистический показатель	Испарение, *мм*	Влияющий фактор			
			температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	инфильтрационное питание грунтовых вод, *мм*	абсолютная влажность воздуха, *мб*.
3,0	*M*	1,65	2,58	2,39	3,64	5,90
	σ	0,36	1,12	1,14	1,31	1,04
	r		0,26	0,24	—0,69	0,39
	ε		0,89	0,94	0,35	0,82

Примечание. *M*, σ, *r*, ε—средние, среднеквадратичное отклонение, коэффициент корреляции и сила связи соответственно.

лученных результатов установлено, что величина испарения имеет прямую зависимость от температуры воздуха, поверхности почвы и дефицита влажности воздуха во всех периодах, кроме цветения и цветения-созревания. В это время величина испарения имеет обратную зависимость с температурой воздуха, поверхности почвы и дефицитом влажности воздуха. Это объясняется интенсивным поливом хлопчатника (в течение 5—6 дней). Часть поливных вод инфильтруется и насыщает зону аэрации. При увеличении влажности испарение с поверхности грунтовых вод уменьшается.

Величина испарения с поверхности грунтовых вод имеет прямую зависимость от температуры зоны аэрации и обратную — от атмосферных осадков и минерализации грунтовых вод во всех периодах. Полученные в результате расчета значения коэффициентов корреляции и сил связи (r_{yx_3} =0,40, 0,43, 0,71, 0,81; ε_{yx_3} = =0,62, 0,60, 0,48; 0,32 при глубинах залегания уровня грунтовых вод 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 *м* соответственно) показали, что в невегетационный период фактором, определяющим величину испарения, является температура зоны аэрации. Остальные — незначительны.

Значения коэффициентов корреляции — r_{yx_1} =—0,60, —0,55, —0,55, —0,42; r_{yx_4} =—0,72, —0,53, —0,39, —0,31 и сил связи ε_{yx_1} = 0,44, 0,69, 0,62, 0,58; ε_{yx_6} =0,52, 0,46, 0,70, 0,72 на глубине 1,0, 1,5 2,0, 3,0 *м* соответственно, полученные для периода всходов, показывают, что существуют сильные корреляционные зависимости между величиной испарения с поверхности грунтовых вод атмосферными осадками и минерализацией, а остальные факторы не имеют большого влияния.

Так, в период бутонизации величина испарения в основном зависит от температуры зоны аэрации и минерализации грунтовых вод. При увеличении глубины залегания уровня грунтовых вод эта зависимость усиливается. В период цветения она в основном зависит от температуры воздуха и зоны аэрации. Степень тесноты связи испарения с температурой воздуха по глубинам уменьшается, а с температурой зоны аэрации увеличивается.

Таблица 45

Статистические показатели, характеризующие величины испарения грунтовых вод и влияющих факторов на участке „Камышгарон" (растительный покров—хлопчатник)

Период	Глубина залегания грун. вод, *м*	Статистические показатели	Испарение, *мм*	Влияющие факторы					
				температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферные осадки, *мм*	дефицит влажности, *мб*	минерализация грунтовых вод, *г/л*
Невегетационный	1,0	*M*	5,34	3,37	4,14	9,13	5,54	3,11	3,2
		σ	1,41	0,84	0,79	1,37	0,89	0,38	0,67
		r		0,55	0,037	+0,40	—0,20	0,14	—0,25
		ε		0,99	0,99	0,62	0,96	0,97	0,82
	1,5	*M*	4,53	3,37	4,14	11,10	5,54	3,11	2,81
		σ	1,16	0,84	0,79	1,97	0,89	0,38	0,61
		r		0,087	0,075	0,43	—0,15	0,15	—0,17
		ε		0,99	0,99	0,60	0,91	0,91	0,90
	2,0	*M*	3,86	3,37	4,14	12,69	5,54	3,11	2,23
		σ	1,01	0,84	0,79	1,91	0,89	0,38	0,73
		r		0,08	0,07	0,71	—0,15	0,12	—0,13
		ε		0,98	0,99	0,48	0,97	0,91	0,98
	3,0	*M*	2,73	3,37	4,14	14,43	5,54	3,11	2,98
		σ	0,91	0,84	0,79	2,13	0,89	0,38	0,99
		r		0,092	0,081	0,81	—0,13	0,11	—0,1
		ε		0,99	0,99	0,32	0,96	9,4	0,95
Всходов	1,0	*M*	9,86	14,35	16,38	11,74	11,27	10,09	4,06
		σ	1,83	1,52	0,99	1,32	1,71	1,71	0,74
		r		0,13	0,23	0,12	—0,60	0,087	—0,72
		ε		0,98	0,94	0,98	0,44	0,99	0,52
	1,5	*M*	4,95	14,35	16,38	11,41	11,27	10,09	3,42
		σ	0,83	1,52	0,99	1,67	1,71	1,71	0,84
		r		0,11	0,18	0,14	—0,55	0,065	—0,53
		ε		0,99	0,96	0,97	0,69	0,97	0,46
	2,0	*M*	2,18	14,35	16,38	11,47	11,27	10,09	2,41
		σ	0,98	1,52	0,99	1,39	1,71	1,71	0,68
		r		0,10	0,15	0,20	—0,55	0,043	—0,39
		ε		0,98	0,94	0,95	0,62	0,99	0,79
	3,0	*M*	1,95	14,35	16,38	11,65	11,27	10,09	1,96
		σ	0,62	1,52	0,99	1,52	1,71	1,71	0,55
		r		0,05	0,12	0,32	—0,42	0,038	—0,31
		ε		0,99	0,98	0,94	0,58	0,99	0,72

Продолжение табл. 45

Период	Глубина залегания грун. вод, м	Статистические показатели	Испарение, мм	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферные осадки, мм	дефицит влажности, мб	минерализация грунтовых вод, г/л
Бутонизации	1,0	M	15,44	23,63	28,27	18,16	1,34	21,08	4,5
		σ	2,04	1,68	1,82	1,06	0,34	1,72	0,98
		r		0,34	0,24	0,19	−0,18	0,015	−0,32
		ε		0,96	0,97	0,98	0,96	0,99	0,89
	1,5	M	6,36	23,63	28,27	16,67	1,34	21,68	3,78
		σ	1,90	1,68	1,82	1,92	0,34	1,72	0,97
		r		0,30	0,22	0,37	−0,048	0,012	−0,48
		ε		0,73	0,85	0,78	0,99	0,99	0,54
	2,0	M	2,74	23,63	28,27	15,52	1,34	21,08	2,67
		σ	0,42	1,68	1,82	1,16	0,34	1,72	0,79
		r		0,28	0,21	0,45	−0,049	0,01	−0,58
		ε		0,94	0,99	0,89	0,99	0,99	0,66
	3,0	M	0,93	23,63	24,77	14,28	1,34	21,08	3,00
		σ	0,23	1,68	1,82	0,94	0,34	1,72	0,85
		r		0,25	0,20	0,74	−0,043	0,057	−0,61
		ε		0,94	0,93	0,34	0,99	0,99	0,44
Цветения	1,0	M	23,98	27,77	32,99	22,75	0,76	27,45	3,72
		σ	1,41	1,04	1,81	0,83	0,24	1,57	0,97
		r		−0,49	−0,36	0,32	−0,18	−0,38	−0,16
		ε		0,86	0,91	0,90	0,97	0,92	0,96
	1,5	M	7,27	27,77	32,99	20,52	0,76	27,45	3,10
		σ	0,73	1,04	1,81	0,66	0,21	1,57	0,12
		r		−0,39	−0,32	0,48	−0,16	−0,29	−0,19
		ε		0,89	0,85	0,91	0,94	0,91	0,94
	2,0	M	3,04	27,77	32,99	18,95	0,76	27,45	2,66
		σ	0,82	1,04	1,81	1,05	0,24	1,57	0,62
		r		−0,35	−0,29	0,51	−0,14	−0,22	−0,26
		ε		0,74	0,72	0,46	0,91	0,96	0,94
	3,0	M	1,35	27,77	32,99	16,69	0,76	27,45	2,66
		σ	0,52	1,04	0,81	0,71	0,24	1,57	0,62
		r		−0,30	−0,28	0,53	−0,12	−0,19	−0,29
		ε		0,74	0,72	0,46	0,91	0,96	0,94

Продолжение табл. 45

Период	Глубина залегания грун. вод, м	Статистические показатели	Испарение, мм	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферные осадки, мм	дефицит влажности, мб	минерализация грунтовых вод, г/л
Цветения-созревания	1,0	M	70,59	25,21	30,87	23,82	1,01	21,38	3,44
		σ	9,91	1,41	3,14	0,89	0,15	1,80	1,06
		r		−0,35	−0,42	0,21	−0,084	−0,45	−0,22
		ε		0,72	0,84	0,92	0,99	0,52	0,45
	1,5	M	16,63	25,21	30,87	21,85	1,01	21,38	2,83
		σ	1,05	1,41	3,14	0,54	0,15	1,80	0,90
		r		−0,24	−0,28	0,30	−0,039	−0,31	−0,37
		ε		0,92	0,91	0,89	0,99	0,89	0,85
	2,0	M	5,43	25,21	21,85	20,55	1,01	21,38	2,50
		σ	0,63	1,41	0,54	0,60	0,15	1,80	0,69
		r		−0,48	−0,15	0,48	−0,021	−0,23	−0,42
		ε		0,96	0,95	0,73	0,99	0,89	0,86
	3,0	M	1,83	25,87	30,87	18,20	1,01	21,38	3,08
		σ	0,34	1,41	3,14	0,34	0,15	1,80	1,03
		r		−0,15	−0,12	0,68	−0,016	−0,21	−0,52
		ε		0,97	0,98	0,24	0,99	0,94	0,96
Созревания	1,0	M	49,45	18,73	22,51	21,28	0,10	13,75	2,48
		σ	2,45	1,29	1,00	0,98	0,02	1,25	0,64
		r		0,54	0,58	0,33	−0,38	0,15	−0,11
		ε		0,46	0,64	0,66	0,78	0,89	0,91
	1,5	M	20,18	18,73	22,51	20,68	0,10	13,75	2,38
		σ	1,96	1,29	0,98	0,42	0,02	1,25	0,61
		r		0,41	0,54	0,44	−0,36	0,12	−0,13
		ε		0,58	0,42	0,71	0,92	0,98	0,87
	2,0	M	7,97	18,73	22,51	20,01	0,10	13,75	2,19
		σ	1,37	1,29	1,00	0,39	0,02	1,25	0,63
		r		0,39	0,48	0,48	−0,30	0,1	−0,29
		ε		0,74	0,62	0,56	0,84	0,97	0,89
	3,0	M	3,00	18,73	22,51	18,41	0,10	13,75	3,00
		σ	0,34	1,29	1,00	0,98	0,02	1,25	0,64
		r		0,38	0,27	0,69	−0,29	0,09	−0,35
		ε		0,64	0,82	0,47	0,84	0,99	0,96

Период	Глубина залегания грун. вод, м	Статистические показатели	Испарение, мм	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферные осадки, мм	дефицит влажности, мб	минерализация грунтовых вод, г/л
Конец вегетационного	1,0	M	24,87	13,57	15,68	19,70	2,94	9,40	2,08
		σ	1,60	1,35	1,76	0,89	0,66	1,18	0,61
		r		0,62	0,70	0,55	−0,01	0,56	−0,40
		ε		0,37	0,24	0,47	0,99	0,78	0,84
	1,5	M	15,77	13,57	15,66	18,72	2 94	9,40	2,21
		σ	2,06	1,35	1,76	1,22	0,66	2,18	0,63
		r		0,55	0,60	0,68	−0,095	0,37	−0,38
		ε		0,57	0,34	0,37	0,99	0,67	0,74
	2,0	M	8,25	13,57	15,68	18,66	2,94	9,40	2,00
		σ	1,08	1,35	1,76	0,87	0,66	1,18	0,52
		r		0,36	0,54	0,70	−0,09	0,18	−0,29
		ε		0,87	0,42	0,23	0,99	0,98	0,96
	3,0	M	4,18	13,57	15,68	18,40	2,94	9,40	2,54
		σ	0,22	1,35	1,76	0,78	0,66	1,18	0,81
		r		0,23	0,28	0,71	−0,072	0,14	−0,28
		ε		0,92	0,89	0,23	0,99	0,97	0,95

Во время цветения-созревания величина испарения больше зависит от минерализации грунтовых вод, с которой степень тесноты связи с глубиной увеличивается. В период созревания она хорошо коррелируется с температурой воздуха и поверхности почвы, степень ее связи с глубиной уменьшается.

В конце вегетационного периода величина испарения тесно связана с температурой воздуха, поверхностью почвы, зоны аэрации и дефицитом влажности воздуха. С уменьшением глубины зависимость испарения от температуры воздуха, поверхности почвы и дефицита влажности воздуха увеличивается, а от температуры зоны аэрации уменьшается.

Процесс испарения с поверхности грунтовых вод для лизиметров с люцерной моделировался также для вегетационного и невегетационного периодов. Получены все статистические показатели, которые характеризуют вариационные ряды, обусловливающие величину испарения и влияющих факторов (табл. 46, 47).

Величина испарения имеет прямую зависимость от температуры воздуха, поверхности почвы и зоны аэрации, дефицита влажности воздуха и обратную от атмосферных осадков и минерализации грунтовых вод. Отметим, что у люцерны первого года посе-

Таблица 46

Статистические показатели испарения грунтовых вод и влияющих факторов („Камангарон", растительный покров—люцерна, вегетационный период)

Год посева	Глубина залегания уровня грунтов. вод, м	Статистические показатели	Испарение, мм	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферн. осадки, мм	дефицит влажности воздуха, мб	минерализация грунтовых вод, г/л
Первый	1.0	M	58,30	21,22	26,04	19,65	1,44	18,59	2,58
		σ	9.74	1,99	1,79	2,23	0,80	1,28	0,71
		r		0.60	0,49	0.42	−0,23	0.44	−0,43
		ε		0,58	0,64	0,81	0,94	0,79	0,81
	1,5	M	28,79	21,22	26,04	18.51	1,44	18,59	2,17
		σ	2.45	1,99	1,79	1,56	0.80	1,28	0,64
		r		0,47	0,45	0,51	−0,16	0,37	−0.64
		ε		0,77	0,79	0,62	0,97	0.85	0,59
	2,0	M	9,92	21,22	26,04	17,59	1,44	18,59	2,17
		σ	1,54	1.99	1,79	2,12	0,80	1,28	0.27
		r		0,40	0,37	0,62	−0,14	0,26	−0,68
		ε		0,83	0.86	0,73	0.97	0,92	0,53
	3,0	M	4,84	21,22	26.04	16,19	1,44	18,59	3,03
		σ	0,85	1,99	1.79	2,28	0,80	1,28	0,27
		r		0,30	0.34	0,64	−0,078	0,12	−0,84
		ε		0.90	0,87	0,81	0,99	0,98	0.99
Второй	1,0	M	87.91	21,14	25,00	18.70	4,31	16.08	1,23
		σ	12,98	5,49	7,25	4.09	0,94	4,41	0,40
		r		0.74	0,78	0,45	−0,39	0,73	−0,53
		ε		0,44	0,39	0,79	0.84	0,46	0,71
	1,5	M	66,72	21.14	25,00	17,63	4,31	16,08	1,32
		σ	5,60	5.49	7.25	3,86	0,94	4.41	0.39
		r		0,69	0.77	0,53	−0,38	0,69	−0,54
		ε		0,51	0,39	0.71	0.85	0.51	0,69
	2,0	M	49,73	21,14	25,00	16,67	4.31	16,08	1,44
		σ	3,21	5,49	7,25	3,40	0,94	4.41	0,48
		r		0,67	0,73	0,46	−0,36	0,69	−0,59
		ε		0,54	0,46	0.68	0,86	0,51	0,64

Год посева	Глубина залегания уровня грунт. вод, м	Статистические показатели	Испарение, мм	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферн. осадки, мм	дефицит влажности воздуха, мб	минерализация грунтовых вод, г/л
Третий	3,0	M	27,34	21,14	25,00	15,80	4,31	16,08	1,21
		σ	4,67	5,49	7,25	2,73	0,94	4,41	0,40
		r		0,64	0,70	0,61	−0,31	0,67	−0,63
		ε		0,51	0,49	0,62	0,89	0,54	0,59
	1,0	M	93,99	22,19	26,14	20,08	1,81	17,87	3,99
		σ	8,84	5,03	4,41	3,40	0,64	2,10	0,91
		r		0,69	0,61	0,25	−0,36	0,64	−0,26
		ε		0,51	0,62	0,93	0,86	0,58	0,93
	1,5	M		22,19	26,14	18,8	1,81	17,87	3,87
		σ		5,03	2,39	1,58	0,64	2,10	0,26
		r		0,68	0,61	0,28	−0,34	0,64	−0,34
		ε		0,59	0,62	0,92	0,88	0,58	0,88
	2,0	M		22,19	26,14	16,11	1,81	17,87	3,07
		σ		5,03	4,41	5,09	0,64	2,10	0,61
		r		0,67	0,60	0,29	−0,31	0,63	−0,35
		ε		0,54	0,62	0,91	0,90	0,59	0,87
	3,0	M		22,19	25,67	14,55	1,81	17,87	3,30
		σ		5,03	4,41	4,37	0,64	2,10	1,43
		r		0,65	0,51	0,37	−0,28	0,63	−0,35
		ε		0,57	0,73	0,86	0,92	0,59	0,87

ва в вегетационный период величина испарения хорошо коррелируется с температурой воздуха и поверхности почвы при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м*, начиная с глубины 1,5 *м* — с температурой зоны аэрации и минерализацией грунтовых вод. Таким образом, с уменьшением глубины залегания уровня грунтовых вод влияние метеорологических факторов на величину испарения увеличивается.

Испарение у люцерны второго года посева больше зависит от температуры воздуха, поверхности почвы и дефицита влажности воздуха при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м*, начиная с глубины 1,5 *м* — от температуры зоны аэрации и минерализации грунтовых вод.

В третьем году посева испарение теснее связано с температурой воздуха и поверхности почвы на всех глубинах залегания уров-

Таблица 47

Статистические показатели испарения грунтовых вод и влияющих факторов („Камангарон", растительный покров—люцерна, невегетационный период)

Год посева	Глубина залегания грунтовых вод, м	Статистические показатели	Испарение, мм	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферные осадки, мм	дефицит влажности воздуха, мб	минерализация грунтовых вод, г/л
Первый	1,0	M	7,49	5,12	6,08	10,16	8,02	3,57	1,92
		σ	2,22	0,85	1,66	2,52	1,78	1,06	0,23
		r		0,27	0,29	0,28	−0,13	0,57	−0,47
		ε		0,92	0,91	0,91	0,96	0,67	0,72
	1,5	M	5,05	5,12	6,08	12,08	8,02	3,57	1,53
		σ	1,02	0,85	1,66	1,35	1,78	1,06	0,25
		r		0,23	0,27	0,48	−0,14	0,37	−0,34
		ε		0,94	0,92	0,76	0,95	0,85	0,64
	2,0	M	3,71	5,12	6,08	13,18	8,02	3,57	2,55
		σ	1,16	0,85	1,66	2,25	1,78	1,06	0,81
		r		0,18	0,21	0,60	−0,20	0,069	−0,3
		ε		0,96	0,95	0,62	0,95	0,99	0,61
	3,0	M	3,35	5,12	6,08	13,76	8,02	3,57	2,88
		σ	1,46	0,85	1,66	2,22	1,78	1,06	0,41
		r		0,054	0,12	0,90	−0,27	0,018	−0,21
		ε		0,99	0,98	0,18	0,92	0,99	0,54
Второй	1,0	M	8,63	0,15	0,80	7,32	9,36	1,68	1,34
		σ	2,49	0,047	0,091	1,14	1,08	0,72	0,091
		r		0,49	0,49	0,13	−0,48	0,52	−0,62
		ε		0,75	0,75	0,98	0,76	0,64	0,61
	2,0	M	7,03	0,15	0,80	9,58	9,36	1,68	1,44
		σ	1,62	0,047	0,091	1,55	1,08	0,72	0,24
		r		0,30	0,37	−0,46	0,44	−0,41	
		ε		0,92	0,90	0,74	0,78	0,80	0,82
	2,0	M	0,15	0,80	11,36	9,36	1,68	1,54	6,38
		σ	0,047	0,091	2,32	1,08	0,72	0,80	1,24
		r	0,18	0,18	0,60	−0,43	0,24	−0,29	
		ε	0,96	0,96	0,63	0,81	0,78	0,91	

Год посева	Глубина залегания грунтовых вод, *м*	Статистические показатели	Испарение, *мм*	Влияющие факторы: температура воздуха, °С	температура поверхности почвы, °С	температура зоны аэрации, °С	атмосферные осадки, *мм*	дефицит влажности воздуха, *мб*	минерализация грунтовых вод, *г/л*
Второй	3,0	*M*	0,13	0,80	13,66	9,36	1,68	1,77	5,86
		σ	0,047	0,091	2,43	1,08	0,80	0,34	1,07
		r	0,13	0,12	0,90	−0,21	0,11	−0,24	
		ε	0,98	0,98	0,17	0,95	0,98	0,89	
Третий	1,0	*M*	9,68	4,02	4,84	9,66	6,09	3,34	7,90
		σ	1,22	1,18	0,34	2,79	1,05	1,51	1,06
		r		0,71	0,80	0,13	−0,11	0,76	−0,067
		ε		0,49	0,35	0,87	0,98	0,41	0,99
	1,5	*M*	8,60	4,02	4,84	11,42	6,09	3,34	2,48
		σ	1,72	1,18	0,34	2,81	1,05	1,51	0,77
		r		0,69	0,77	0,15	−0,069	0,76	−0,10
		ε		0,51	0,40	0,97	0,99	0,41	0,98
	2,0	*M*	7,76	4,02	4,84	12,59	6,09	3,34	2,75
		σ	0,86	1,18	0,34	2,75	1,05	1,51	0,26
		r		0,65	0,71	0,17	−0,013	0,70	−0,034
		ε		0,57	0,49	0,91	0,99	0,49	0,99
	3,0	*M*	7,45	4,02	4,84	14,26	6,09	3,34	3,08
		σ	1,13	1,18	0,34	2,37	1,05	1,51	0,40
		r		0,35	0,37	0,25	−0,011	0,49	−0,019
		ε		0,87	0,85	0,93	0,99	0,75	0,96

ня грунтовых вод. Во втором и третьем году с уменьшением глубины влияние метеорологических факторов увеличивается, а температуры зоны аэрации и минерализации грунтовых вод уменьшается.

В невегетационный период величина испарения у люцерны первого года посева более зависит от температуры зоны аэрации, причем степень тесноты связи по глубинам увеличивается.

В невегетационный период величина испарения люцерны второго года посева зависит от температуры воздуха и поверхности почвы, дефицита влажности воздуха и минерализации грунтовых вод. С глубиной степень тесноты связи уменьшается.

В третьем году величина испарения хорошо коррелируется с температурой воздуха, поверхности почвы и дефицитом влажности воздуха. Степень тесноты связи уменьшается аналогично предыдущей.

ГЛАВА III

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИСПАРЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИСПАРЕНИЯ

М. И. Львович (1970) охарактеризовал скорости обмена стационарного объема воды в гидросфере. Наименьшей скоростью обмена обладают ледники — 8,6 тыс. лет при стационарном объеме воды 24,0 тыс. *км*³, все подземные воды земного шара — 5 тыс. лет при 60 тыс. *км*³, мировой океан — 3 тыс. лет — 1370 тыс. *км*³, озера — 10 лет — 0,23 тыс. *км*³, почвенная влага 1 год— 0,08 тыс. *км*³, пары атмосферы — 0,027 лет — 0,014 тыс. *км*³.

Верхняя часть подземной гидросферы мощностью 0,8 *км*, по Р. Нейс (1972), характеризуется скоростью водообмена ориентировочно 1/3 тысячелетия. Подземной гидросфере свойствен большой диапазон активности водообмена: от одного года для «верховодки» до многих тысячелетий для глубоко залегающих подземных вод, в некоторых случаях возраст подземных вод и водовмещающих пород идентичен.

Скорость обмена почвенной влаги примерно один год, а в орошаемых районах при близком залегании ирригационно-грунтовых вод, дренированности территорий может достигать 6—7 раз в год и более, атмосферные пары — 0,027 года, т. е. почти через каждые 10 суток или 37 раз в год.

Испарение грунтовых вод — одно из важных звеньев в общем круговороте воды в системе гидросфера — литосфера — атмосфера. Скорость испарения воды из почвы зависит от многих условий: температуры и влажности воздуха, скорости, влажности и структурных особенностей ветра, влажности и других особенностей поверхностного слоя почвы, скорости подтока к испаряющей поверхности и т. д. Скорость подтока воды в почве определяют три фактора: сила, действующая на элемент объема почвенной воды; сопротивление потоку, оказываемое пористым пространством почвы; свойства почвенной влаги. Первая состоит из гравитационной силы, стремящейся заставить элемент опуститься вниз, и силы, связанной с различием гидростатических давлений в разных точках системы и стремящейся вызвать движение элемента из зоны высокого давления в зону низкого.

Э. Чайдлс (1973) на основании опытов в песках и сланцевой пыли, сопоставления результатов экспериментов с теоретическими расчетами установил изменчивость водопроводимости при изменении влажности грунтов. Он отметил, что проводимость убывает в начальных стадиях ненасыщенности. Для определения скорости потока влаги в первой фазе Чайлдс предложил зависимость (62):

$$V_{vap} = K_{vap} \operatorname{grad} H, \text{ где } K_{vap} = \frac{a(f-c)(\sigma_0 g M D_l)}{RT} e^{mgh/kr}, \qquad (62)$$

f и c — общая и заполненная водой пористость;

σ_0 — масса пара на единицу объема воздуха, находящегося в контакте с водой при нулевой сосущей силе;

M — молекулярный вес воды;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура (величина потока пара пропорциональна градиенту водяного пара в воздухе);

D_l — коэффициент пропорциональности, или диффузии водяного пара в воздухе. Коэффициент a принимается равным 0,6;

H — сосущая сила, всегда отрицательная.

И. С. Пашковский (1973) отмечает, что при капиллярно-сорбционном гистерезисе всасывающее давление, соответствующее некоторой влажности, при насыщении породы выше, чем при ее обезвоживании. Некоторые исследователи объясняют факт движения влажности от меньшего значения к большему влиянием гистерезиса. В этом случае И. С. Пашковский отмечает, что «движение влаги при сушке действительно происходит против градиента влажности, но не против градиента всасывающего давления». Г. К. Топп (1971) считает, что коллекторские и фильтрационные свойства грунтов обладают гистерезисом, т. е. они зависят от того, какому увлажнению или высушиванию подвергался грунт в прошлом. Гидравлическая проводимость в начале высушивания выше, чем в последующих циклах.

Основной источник энергии, расходуемой на испарение, — солнечное тепло. Приход изнутри к поверхности почвы очень мал — около 55 *кал/см²·год*. По данным В. Р. Волобуева (1974), величина суммарного испарения закономерно изменяется от 50 *мм/год* и менее в тундре и пустынях до 1100 *мм/год* и выше во влажнотропических условиях. В тундре и пустынях расход тепла на суммарное испарение составляет менее 3000—6000 *кал/см²·год*. В первой это связано с ограниченным приходом энергии, а во второй — влаги. Максимальный расход тепла на суммарное испарение во влажнотропических условиях достигает 60 000 *кал/см²·год*, соответственно на экваторе, в бассейне р. Конго, за год испарение достигает 1220 *мм/год*, а на той же широте в Кении — 1500 *мм/год*.

В. Р. Волобуев (1974) считает, что «...превращение воды на земной поверхности рассматривается как вполне замкнутый круговорот». Но при этом нужно учесть, что в процессе почвообразования часть воды остается в зоне аэрации, так как развитие новых минеральных и органических веществ, растительных и животных организмов приводит к формированию компонентой воды (табл. 48).

Ниже кратко охарактеризуем основные факторы испарения по результатам обобщений М. П. Козлова, Г. Я. Огневой, С. Ф. Федорова и Д. И. Шашко, которые в некоторой степени ориентировочны и нуждаются в дальнейшем уточнении для условий орошаемого земледелия.

Испарение с поверхности почвы начинается приблизительно через 0,5—1,0 часа после выхода солнца и прекращается примерно за 0,5—1,0 часа до захода. Затраты тепла на испарение в ночное время не превышают пределов точности измерений. По данным Г. А. Огневой (1959), в с-зе «Пахта-Арал» за 10 дней июля дневной ход суммарного испарения с орошаемого поля, занятого хлопком, аналогичен вышеприведенному. С. Ф. Федоров (1957) считает, что суточный ход испарения и транспирации древесной растительностью близок к суточному ходу суммарного испарения с луга и характеризуется теми же особенностями.

Таблица 48

Количество воды, аккумулированной в верхнем 3,0 *м* слое почвогрунтов и растительном веществе на примере характерных биогеоценозов (по В. Р. Волобуеву)

Зональный тип биогеоценоза	Капиллярная и пленочная	Гидратная	Структура гумуса	В растительном веществе	Структура растительн. вещества	Всего
			в миллиметрах			
Тундровый	1005	115	7	0,6	0,1	1128
Подзольнотаежный	1020	88	5	19	4	1136
Влажнотропический	780	441	7	95	20	1143
Степной	720	180	15	3	1	919
Сухостепной	600	75	6	2	1	684
Сероземный	450	140	3	1	1	595
			в процентах			
Тундровый	89,1	10,2	0,6	0,05	0,008	100
Подзольнотаежный	89,8	7,7	0,4	1,6	0,35	100
Влажнотропический	58,1	32,8	0,5	7,1	1,5	100
Степной	78,4	19,6	1,6	0,3	0,1	100
Сухостепной	87,7	11,0	0,9	0,3	0,1	100
Сероземный	75,6	23,5	0,5	0,2	0,2	100

Наиболее тесная связь суммарного испарения с солнеч— радиацией, по данным М. П. Козлова (1957), выражена пизон-линией. Аналогичное установлено в Голодной степи и ' ской котловине Б. Ф. Милькисом. Транспирация связительного средственно с солнечной активностью, а регулирующасти расти-

ичного аппарата растения заметного влияния на нее не оказывает. Начало и конец суммарного испарения и транспирации, время наступления максимума интенсивности тесно связаны с началом, прекращением и максимумом суммарной радиации. Ночью, когда радиация отсутствует, испарение не наблюдается, для начала необходим минимум поступления радиации, который, по М. П. Козлову (1957), для европейской части СССР не превышает 3—5 *кал/см²/час*. В условиях Средней Азии, по данным Б. А. Айзенштата (1953), затраты тепла на испарение чрезвычайно велики — средняя максимальная величина достигает 0,93 *кал/см²/мин*. За сутки в июле затрачивается 500 калорий, что соответствует слою воды более 8 *мм/сутки*. Максимум приходится на дневные часы, ночью составляет около 0,3 *мм*.

М. М. Будыко (1973) считает, что наибольший приток коротковолновой радиации на 1 *см²* горизонтальной поверхности почти никогда не превышает 1,6 *кал/мин·см²*, причем не менее 5—10% тратится на отражение и около 0,2 *кал/мин·см²* на эффективное излучение. Следовательно, возможный радиационный баланс приблизительно равен 1,3 *кал/мин·см²*. По С. И. Харченко (1967), отражение (альбедо) после полива уменьшается, радиационный баланс увеличивается на 4—5%, а в отдельные моменты — на 10—15%. Согласно результатам исследований Ф. А. Муминова (1970), в Приташкентском районе при средней высоте хлопчатника 0,55 *м* и относительной площади листьев 1,6 полуденная величина радиационного баланса составляет 0,54 *кал/см²·мин*, или 64% его значения над растительным покровом. При развитом хлопчатнике со средней высотой растений 0,92 *м* и относительной площадью листьев 4,2 радиационный баланс уменьшается до 0,2 *кал/см²·мин*, или 22% радиационного баланса поля. При повышении транспирации в целом за счет увеличения зеленой массы радиционный баланс на высоте 0,1 *м* от поверхности земли может существенно измениться.

Облака, затеняя солнце, рассеивают, поглощают и отражают поток лучистой энергии — прямую радиацию. При затенении испаряющей поверхности интенсивность суммарного испарения снижается почти в два раза и суточный ход нарушается.

Начало повышения температуры воздуха после ночного минимума совпадает с началом испарения. От начала до наступления максимума ход температуры воздуха соответствует ходу испарения. Аналогичное соответствие установлено А. С. Шамуковым в Голодной степи на опытном поле с люцерной. Наступление наивысшей температуры воздуха смещается на более позднее время по сравнению с максимумом испарения.

Начало испарения, время наступления максимума и прекращение испарения в течение суток не зависят от температуры воздуха, поэтому она не определяет расход влаги на испарение в течение суток.

Связь испарения с абсолютной влажностью, по М. П. Козлову (1957), обратная: утром максимальным значениям влажности соответствует минимальное испарение; дневной минимум наблюдается при наивысшей интенсивности испарения, а при вторичном максимуме абсолютной влажности вечером испарение обычно равно нулю. Согласно Ф. А. Муминову (1970), в период значительного развития хлопчатника от цветения до раскрытия коробочек ход абсолютной влажности воздуха в течение дня в общем увеличивается в связи с интенсивным испарением, на фоне которого в сфере развития растений вырисовывается один максимум во второй половине дня и один минимум перед выходом солнца. На высоте 2,0 *м* наблюдаются два четко выраженных минимума и максимума абсолютной влажности воздуха. Ослабление и в некоторых случаях отсутствие дневного минимума абсолютной влажности в среде связано с интенсивным испарением при ограниченном турбулентном перемешивании припочвенного воздуха со слоями, расположенными под растительным покровом хлопчатника. При максимальных значениях дефицита влажности воздуха в ночные часы испарения нет или оно незначительное. С ростом температуры воздуха дефицит влажности увеличивается и интенсивность испарения возрастает. Такой параллелизм в суточном ходе продолжается до момента наступления максимума испарения. Во второй половине дня ход этих элементов нарушается: испарение начинает снижаться при продолжающемся росте дефицита влажности, уменьшается через некоторое время после максимума испарения. Общий ход зависимости испарения и дефицита влажности воздуха аналогичен связи с температурой.

Во время дождя расход влаги на испарение с почвы и транспирацию снижается до нуля или настолько мал, что не фиксируется применяемыми методами и приборами.

При низкой влажности почвы испарение утром начинается позднее и заканчивается вечером раньше, чем при более высокой влажности, величина которого значительнее (80%), чем при низкой.

По данным Д. И. Шашко (1940), транспирация увеличивается с усилением ветра до 0,5 *м/сек*, дальнейшее повышение скорости ветра расхода влаги не увеличивает. Аналогичные заключения сделал К. А. Блэк (1973) на основании экспериментов, проведенных на поле с подсолнечником (рис. 21).

Минимум скорости ветра в суточном ходе, по средним данным, не достигает нулевых значений, тогда как испарение начинается утром и в большинстве случаев заканчивается вечером. Максимум испарения наступает раньше, чем скорость ветра достигает больших значений. Ее влияние на испарение проявляется косвенно — через ослабление или усиление турбулентного обмена в горизонтальном слое воздуха.

Температура почвы под влиянием орошения и растительного покрова существенно изменяется. В период сомкнутости расти-

тельного покрова ослабевает нагрев почвы, при поливе значительное количество тепла затрачивается на испарение с борозд, что в свою очередь снижает температуру. Для характеристики обратимся к результатам исследований Ф. А. Муминова (1970). Он подчеркивает, что в период всхода — бутонизации температура почвы на всех полях наиболее высокая на поверхности в мае-июне (днем 50—51°), с глубиной уменьшается (на 0,2 *м* не превышает 24—25°). В период бутонизации — цветения хлопчатника возникают различия в температуре почвы, обусловленные режимом орошения и развития зеленой массы растений.

В середине XVIII в. впервые в России в лабораторных условиях Рихман установил зависимость испарения от температуры воздуха, глубины сосудов. В начале XX века П. С. Коссович (1904) установил три стадии испарения при высыхании почвы. В начале скорость испарения в течение некоторого времени сохраняется приблизительно постоянной, во второй стадии быстро снижается, вплоть до достижения сравнительно малой величины, в последней медленно убывает до высыхания почвы.

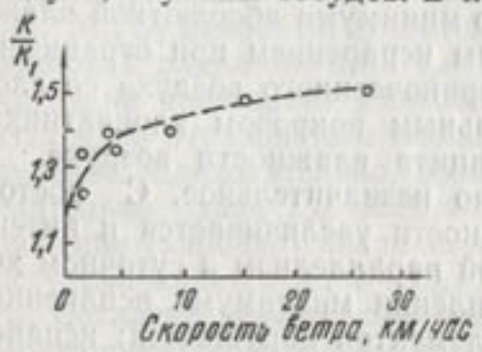


Рис. 21. Относительная скорость испарения воды из растений подсолнечника на ветру K и в спокойном воздухе K_1 в зависимости от скорости ветра (по К. А. Блэку).

Еще в 90-х годах прошлого столетия К. А. Тимирязев установил, что расход воды на транспирацию значительно превышает действительную потребность растений в обычных условиях. По М. М. Будыко (1948), на транспирацию растительным покровом существенно влияют свойства подстилающей поверхности, которые имеют особенно большое значение для условий испарения с поверхности суши.

Г. Роуер, В. Давыдов, О. Познышева и др. установили различие скоростей испарения из испарителя и бассейна. Были разработаны редукционные коэффициенты, однако из-за динамичности внешних факторов по сезонам года они оказались изменчивыми. В 1949—1950 гг. экспериментальными исследованиями установлена связь испарения с водной поверхности от размеров испарителя при активном влиянии конструктивных особенностей приборов, трансформации воздушного потока, набегающего с суши, местного изменения условий под испаряющей поверхностью.

Испарение определяется разностью двух больших потоков молекул, вытекающих из жидкости и возвращающихся в нее, выражается формулой Кнудсена — Ленгюмера:

$$E = \alpha (e_п - e_s) \sqrt{\frac{m}{2\pi KT}}, \qquad (63)$$

где E — испарение;
α — коэффициент испарения;
$e_п$ — максимальная упругость пара при температуре испаряющей поверхности;
e_s — упругость в облаке паров вблизи водной поверхности;
m — масса молекулы;
K — постоянная Больцмана;
T — температура.

Установлена зависимость испарения с водной поверхности от степени минерализации. По данным Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории, испарение в растворе с концентрацией 35% оказалось заниженным в среднем на 3%.

В 1967—1969 гг. В. И. Кузнецов и В. С. Голубев установили, что испарение с промстока со средней минерализацией 150 *г/л* в среднем на 20—30% меньше, чем с пресной воды. На испарение также влияют минерализация, химический состав, прозрачность, цвет жидкости и гидрометеорологические условия. Между величинами испарения минерализованных жидкостей и пресной воды существует зависимость

$$E_п = \alpha E_0 - \beta. \qquad (64)$$

α и β зависят от метеорологических условий и плотности рассолов. При одном и том же количестве растворенного вещества в воде NaCl и NH_4Cl хуже всего уменьшают испарение. В промстоках с кислотным составом испарение меньше, чем с щелочным.

Испарение с насыщенной водой почвы вследствие большей ее поверхности (из-за шероховатости) и интенсивного поглощения тепла в результате изменения альбедо при одних и тех же условиях выше, чем с водной поверхности.

В ненасыщенных почвах при влажности ниже наименьшей влагоемкости испарение происходит за счет высыхания почвы, величина которого определяется скоростью диффузии пара через вышележащий сухой слой почвы, очень мала и не превышает долей миллиметра в сутки.

На интенсивность испарения с поверхности почвы сильно влияет растительный покров, при наличии которого расход влаги гораздо меньше, чем с оголенной поверхности. Соотношение расходов влаги на транспирацию растениями и испарение с почвы в течение вегетационного периода существенно меняется. До образования сомкнутого покрова непроизводительные расходы имеют большой удельный вес.

По Н. А. Максимову и В. А. Новикову (1948), с возрастом растений меняются коллоидно-химические свойства протоплазмы, в том числе ее проницаемость. Молодые растения в процессе старения протоплазмы теряют активные функции, вследствие этого замедляется подвижность воды, уменьшается водоотдача клеток, снижается интенсивность перехода воды в парообразное

состояние в межклеточниках, сообщающихся устьицами с атмосферой.

М. И. Будыко (1948) считает, что травяной покров в результате уменьшения турбулентного обмена вблизи поверхности на 30—35% понижает скорость испарения с почвы.

По данным Бухарской гидрогеологической станции, в 1959 г. при прочих равных условиях суммарное испарение составило 1492 *мм/год*, а транспирация растительным покровом — 1346 *мм/год*, следовательно, на долю испарения с почвенной поверхности остается 146 *мм/год*, тогда как по испарителю с оголенной поверхностью — 422 *мм/год*. Таким образом, занижение испарения с почвенной поверхности под влиянием растительного покрова равно 275 *мм/год*, что составляет 65,4%.

А. Р. Константинов (1968) указывает, что прирост растительной массы происходит гораздо интенсивнее, чем увеличивается расход воды, особенно при высоком уровне агротехники. В настоящее время во всех расчетах, связанных с составлением водных балансов, редукционный коэффициент принимается постоянным, тогда как Бригс и Шанц доказали существенную изменчивость редукционных коэффициентов по сезонам года от вида растений и общих климатических условий.

В. Н. Кунин (1959) указывает, что «...внутригрунтовое испарение, являясь процессом геологического масштаба (по времени и охватываемой им территории), определяет повышение общей концентрации подземных вод по мере их движения». Согласно А. С. Вишнякову (1975), «...количественная сторона этого вопроса, которую можно было бы учесть в балансе грунтовых вод, определена ориентировочно». На основе анализа гидрогеологического процесса и расчета некоторых гидрохимических параметров для условий Ассакеауданской впадины величина внутригрунтового испарения определена 0,007 *м/год* или 78 тыс. *м³/сут.* на площади 40 тыс. *км²*.

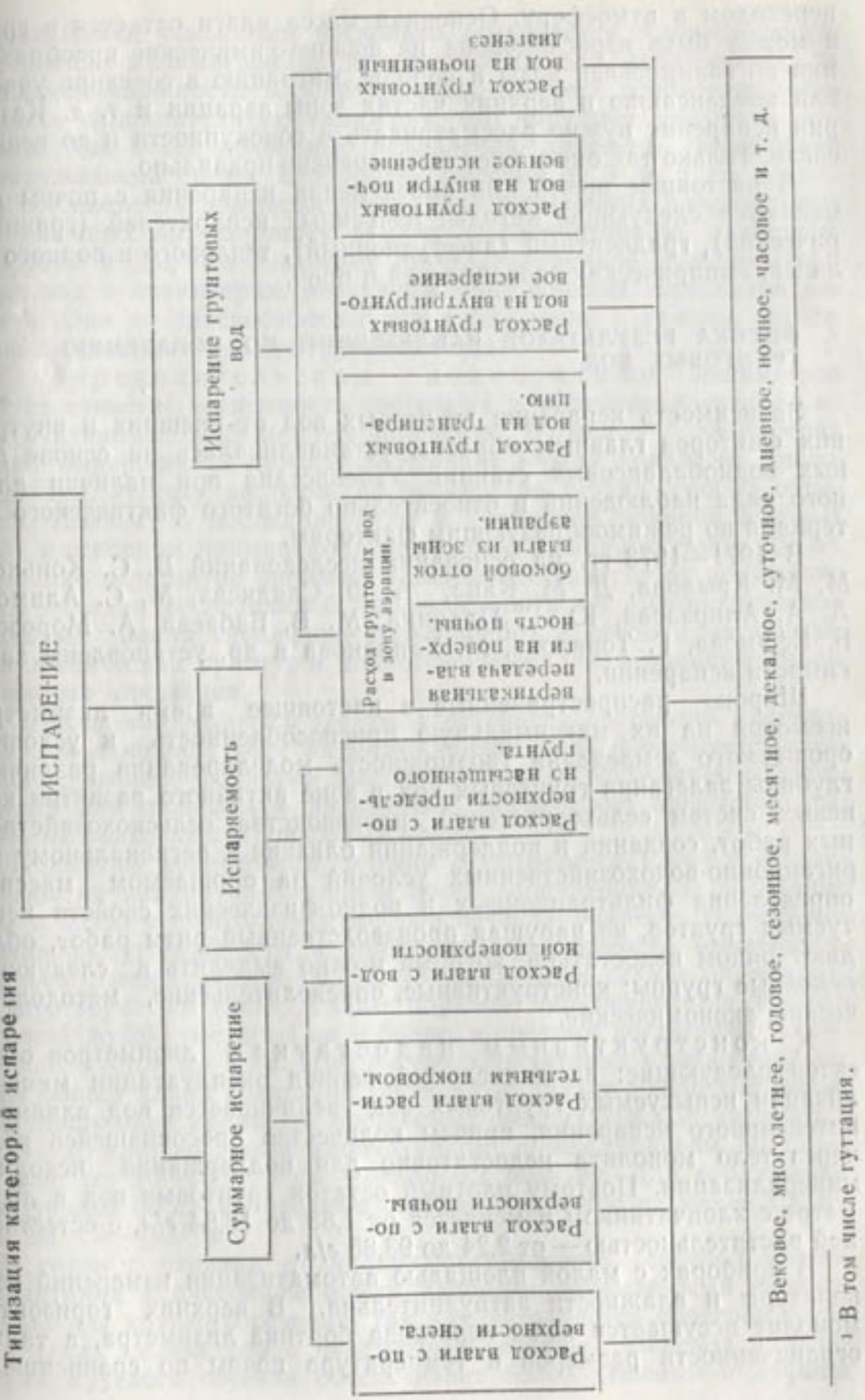
Почвоведы выделяют внутрипочвенное испарение. Н. А. Качинский (1975) указывал: «...Поскольку почвенный воздух почти всегда сырее атмосферного, замена его последним ведет к просушиванию почвы. Следовательно, почва может испарять и терять воду не только своей поверхностью, но и через внутренние слои и поры. Такое испарение в отличие от поверхностного называется внутрипочвенным».

По нашему мнению, говоря о внутригрунтовом испарении, следует подразумевать расход влаги с зеркала грунтовых вод и ее перераспределение в зоне аэрации, а также иногда передачу в атмосферу; под внутрипочвенным — аналогичные процессы в почвенном горизонте. М. Липперт выделяет эвапорацию — испарение задержанной растительностью воды. Для полного представления о категориях испарения приводится схема типизации.

В отличие от всех предыдущих видов внутригрунтовое испарение представляет собой передвижение влаги с необязательным

Схема 1

Типизация категорий испарения



переходом в атмосферу. Основная масса влаги остается в грунте и может быть израсходована на физико-химические преобразования по взаимосвязи воды и породы, миграцию в соседние участки или конденсацию в верхних частях зоны аэрации и т. д. Категории испарения нужно рассматривать в совокупности и во взаимосвязи. Только так оно может быть оценено правильно.

В настоящее время для определения испарения с почвы применяются следующие методы: почвенных испарителей (гравиметрический), градиентный (диффузионный), теплового и водного баланса, эмпирических зависимостей и проч.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ПО ИСПАРЕНИЮ ГРУНТОВЫХ ВОД

Зависимость испарения грунтовых вод от внешних и внутренних факторов главным образом устанавливалась на основе данных воднобалансовых станций Узбекистана при наличии длинного ряда наблюдений и относительно богатого фактического материала по режимообразующим факторам.

В 1971—1973 гг. на основании исследований Б. С. Конькова, М. М. Крылова, Д. М. Каца, А. Ф. Сляднева, М. С. Алимова, А. А. Алирзаева, Ю. Г. Планина, М. В. Бабаева, А. Морозова, Б. Ефимова, Г. Топалова, М. Хапланова и др. установлены зависимости испарения.

Широко распространенные в настоящее время лизиметры, несмотря на их максимальную приспособленность к условиям орошаемого земледелия (возможность моделирования различной глубины залегания грунтовых вод в зоне активного развития корневых систем сельхозрастений, производства сельскохозяйственных работ, создания и поддержания близких к региональному ирригационно-водохозяйственных условий на орошаемом массиве, определения фильтрационных и водно-физических свойств испытуемых грунтов, не нарушая производственный ритм работ, обладают рядом недостатков, которые можно выделить в следующие основные группы: конструктивные, определительские, методологические, экономические.

К конструктивным недостаткам лизиметров относятся следующие: за длительный период эксплуатации минерализации испытуемых грунтовых вод увеличивается под влиянием интенсивного испарения, причем количество просочившейся воды через тело монолита недостаточно для поддержания исходной минерализации. Поэтому плотный остаток грунтовых вод в лизиметре с хлопчатником изменяется от 1,83 до 18,84 *г/л*, с естественной растительностью — от 2,24 до 93,85 *г/л*.

В приборах с малой площадью автоматизация измерений температуры и влажности затруднительна. В верхних горизонтах монолит иссушается из-за перегрева бортика лизиметра, а также ограниченности размеров и температура почвы по сравнению с

окружающими условиями несколько повышается. Существующие конструкции лизиметров не приспособлены для наблюдений за динамикой влажности в зоне аэрации, поэтому необходимо оборудовать дополнительную скважину, что нарушает цельность монолита. Как и все почвенные испарители, лизиметр изолирован от окружающей среды. Его бортик высотой от 3 до 5 *см* исключает возможность поверхностного стока избыточных оросительных вод, обычных на поливных землях с хлопчатником, люцерной, кукурузой и др., что завышает инфильтрационное питание грунтовых вод в лизиметрах, переувлажнение верхних горизонтов монолита. Они не приспособлены для наблюдений в режиме естественно-переменного уровня грунтовых вод.

К определительским недостаткам лизиметров следует отнести: зависимость состояния и развития растений от конструктивных особенностей приборов. В малых лизиметрах трудно выдерживать нужное расстояние между грядками, способы посева, густоту растений из расчета на гектар, способ обработки. Поэтому в последние годы в практике воднобалансовых работ в основном применяются приборы с площадью более 1,0 $м^2$. Состояние и развитие растений в лизиметре зависит от понимания целей и задач исследований наблюдателями на лизиметрической площадке, знания специфики сельхозработ в связи с выращиванием технических культур и добросовестного учета поливных норм и режима орошения.

Нередко наблюдаются факты угнетенного состояния хлопчатника или люцерны, хотя на окружающем поле фиксируется нормальное, пышное развитие растений. Иногда урожайность хлопчатника или люцерны в лизиметрах значительно превышает таковые на колхозных и совхозных полях.

Лизиметры квадратного сечения с размерами $1{,}2 \times 1{,}2$ $м^2$ рассчитаны на квадратно-гнездовой посев хлопчатника. В последние годы в связи с необходимостью обеспечения раннего созревания повышения урожайности и снижения себестоимости практикуется посев с междурядьем 60, 90, 75 *см*. В этом случае применяется двустворчатый посев. Таким образом, обеспечивается густота растений до 200 тыс. на 1 *га* и более, в среднем достигается 110—140 тыс. кустов на 1 *га*. При посеве хлопчатника с междурядьем 60 *см* общая длина грядок на гектаре составляет 16,666 тыс. *пог м*.

В настоящее время на орошаемых землях УзССР засевается около 1,8 млн. *га* земли хлопчатником: с междурядьем 60 *см* — 0,8 млн. *га;* 90—0,8; 75 *см* — около 0,2 млн. *га*. Для соблюдения междурядья 60 *см* необходимо сечение лизиметра не менее 1,2 $м^2$, для 90 *см* — 1,9 $м^2$.

В связи с отказом от квадратно-гнездового способа посева хлопчатника в настоящее время наиболее приемлемыми являются приборы круглого сечения, так как устраняется перегрев грунта в углах лизиметров с квадратным сечением. Переход к лизиметрам круглого сечения обеспечивает более дешевый и лучший

по технологическим условиям способ зарядки короба с монолитом и отсечки целика.

В лизиметрах отсутствует независимый от человека дренажный сток, что, конечно, отражается на оптимальности условий опытов. На орошаемых землях он составляет 10—30% от нормы водоподачи, а на интенсивно дренированных землях еще более высокий. С дренажными водами обычно сбрасывается определенная часть удобрений, проникших в зону аэрации (область развития корневых систем растений). Если сток отсутствует, повышается удобренность зоны аэрации по сравнению с окружающими почвенными условиями, повышается влажность. Если принять во внимание зависимость транспирационной способности от развития зеленой массы, а испарения в целом — от влажности почвы, то отсутствие непрерывного дренажного стока будет существенно влиять на процесс испарения грунтовых вод.

К методологическим недостаткам относятся следующие: оптимальные размеры фона вокруг лизиметрической площади и каждого лизиметра с определенной растительностью или деятельной поверхностью не разработаны. Ранее на оптимальность размеров фоновой площади достаточного внимания не обращалось или этот факт считался несущественным, имея в виду недостатки лизиметрического метода исследований в целом. Играют роль некоторые административные вопросы, связанные с отчуждением земель для опытных работ, а также технико-экономические соображения.

Определение суммарного испарения в лизиметре без учета динамики влажности в зоне аэрации отмечается в практике воднобалансовых исследований. В настоящее время при изучении суточной величины испарения грунтовых вод в лизиметрах изменение запасов влаги между начальным и конечным сроками наблюдений не учитывается. Это не принимается во внимание и при расчете месячной величины испарения за вегетационный и невегетационный периоды, а также за год. Считается, что динамика влажности грунтов зоны аэрации между сроками наблюдений существенных изменений не претерпевает. Ориентация на относительно постоянную влажность грунтов, с нашей точки зрения, ошибочна и, конечно, сказывается на точности результатов лизиметрических наблюдений по испарению.

Определение испарения с поверхности почвы по результатам вычитания транспирации из суммарного испарения в методическом отношении неправильное. Это влечет за собой существенные ошибки, связанные с тем, что доля испарения с поверхности почвы в условиях затенения растительным покровом — значительно меньше по сравнению с данными приборов, характеризующими испарение с открытой поверхности, т. е. на участках, незатененных растительностью.

Цельность монолита нарушается в процессе эксплуатации лизиметра в связи с необходимостью специальных наблюдений

(контрольная труба за уровнем грунтовых вод в теле монолита, измерительная для производства влажностных наблюдений, бурение скважин для отбора проб грунта на влажность и водную вытяжку). В связи с этим формируемый процесс в лизиметре несколько отличается от необходимого. Цельность монолита в процессе отбора также нарушается, так как при этом применяются удары о борт лизиметра, различные грузы, прессы для надевания короба на монолит.

К экономическим недостаткам относится высокая стоимость установки лизиметра. Опыт работ Голодностепской и Азербайджанской гидрогеологических станций показывает, что на изготовление одного лизиметра затрачивается 420 руб., на установку — 446 руб. В условиях близкого залегания грунтовых вод на одну установку с площадью поперечного сечения 1,0—1,44 $м^2$ затрачивается 866 руб., тогда как установка одного почвенного испарителя ГГИ—500—100 вместе со стоимостью не превышает 150—200 руб. и срок службы последнего в несколько раз больше, чем у лизиметра.

Недолговечность лизиметрических установок — один из главных недостатков. Обычные приборы, изготовленные из 4-миллиметрового листового железа, в результате воздействия высокоминерализованных грунтовых вод и коррозии металла теряют прочность и через 3—4 года начинают течь, становятся непригодными для дальнейшей эксплуатации.

После истечения амортизационного срока лизиметры не подлежат восстановлению. Наружный ремонт их не эффективен, экономически невыгоден, а внутренний связан, по существу, с установкой нового прибора. Поэтому приборы ликвидируются, наблюдения по ним прекращаются ввиду дороговизны горнопроходческих работ по демонтажу лизиметра.

Результаты обработки материалов воднобалансовых исследований, проведенных в Голодной степи, показали значительную зависимость интенсивности испарения грунтовых вод от площади лизиметров. Характеризуя связь испарения по годовым величинам, можно констатировать в приборах площадью 0,1 $м^2$ величину испарения в несколько раз выше, чем в лизиметрах с сечением 5,2 $м^2$. Причина повышенного испарения грунтовых вод в лизиметрах с меньшей площадью по сравнению с большей при сохранении идентичности фоновых, водохозяйственных и других условий в связи с выполнением экспериментов — в относительном перегреве грунта в малых лизиметрах, а также в некотором различии условий роста, развития растений, затененности почвенной поверхности под растительным покровом и т. д.

Зависимость расхода влаги от размеров испаряющей поверхности и последних от мощности зоны аэрации, характера деятельного покрова до настоящего времени не учитывалась. В связи с пересмотром и оценкой фактических данных считаем необходимым обратить на это внимание.

Исследователи (Деан, 1971, Жакен, 1965, Кац, 1964, Рабочев, 1974, Константинов, 1968) давно замечали влияние минерализации грунтовых вод на процесс возгонки пара с зеркала подземных вод. Нами установлено, что при изменении минерализации в среднем от 1,0 до 2,0 и 8,5 *г/л* испарение и транспирация грунтовых вод снижаются на 18 и 27% соответственно. По данным И. С. Рабочева (1974), в Чарджоуском оазисе при увеличении минерализации грунтовых вод от 1,0 до 5,0 и 15,0 *г/л* испарение в среднем уменьшилось соответственно на 9,3 и 22%, что весьма существенно и следует принимать во внимание при расчетах.

Влияние механического состава грунтов на процесс испарения не учитывалось ввиду отсутствия проработок. В последнее время по результатам зарубежных (Талсма, 1974) и отечественных (Беспалов, 1970) лизиметрических исследований, проведенных в Ферганской котловине и оазисах Бухары, установлена существенная зависимость испарения с зеркала грунтовых вод от механического состава грунтов зоны аэрации. В грунтах с тяжелым механическим составом испарение выше, чем в средних и легких разностях. Зависимость испарения от состава грунтов объясняется интенсивностью капиллярных сил, и как следствие, мощностью капиллярной каймы.

Влияние структуры испытуемого грунта на процесс испарения не установлено. Существуют противоположные точки зрения. Одни исследователи (Алимов, 1965) утверждают, что в лизиметрах с насыпным грунтом в силу возникновения комковой структуры, образования макропористости, наилучших условий циркуляции влаги и воздуха в зоне аэрации скорость влагообмена между лизиметром и атмосферой может несколько повышаться. Это в условиях жаркого с большим дефицитом влажности климата может существенно увеличить расход влаги из лизиметров. С течением времени под влиянием частичного восстановления структуры грунтов испытуемая почва по своим свойствам становится близкой к естественной и тогда величины испарения грунтовых вод в лизиметрах с разной структурой почв окажутся близкими. Другая — противоположная точка зрения — заключается в том, что грунты с естественной структурой в силу сохранения капиллярных пор расходуют влаги больше, чем в нарушенных условиях, так как подсос влаги капиллярами под влиянием силы менисковых натяжений усиливает подачу воды с зеркала грунтовых вод к дневной поверхности. В результате рыхления поверхностных слоев почвы вследствие «срезки» капиллярных трубок расход влаги уменьшается. По данным И. Б. Ревут (1973), при влажности почвы 35—100% от полной влагоемкости монолитный грунт испаряет с большей скоростью, чем насыпной. При влажности почвы меньше 35% полной влагоемкости насыпной грунт, наоборот, испаряет воды больше, чем монолитный. Видимо, влияние структуры грунта на испарение грунтовых вод сказывается различно в зависимости от влажности почв и мощности зоны аэрации.

Интенсивность испарения грунтовых вод зависит от вида деятельного покрова и особенностей развития корневых систем, мощность которых, кроме зеленой массы растений, связана с глубиной залегания грунтовых вод: чем глубже, тем мощнее развиваются корни многолетних растений, следовательно, тем больше масса волосистых корней, которые несут влагососущие функции. Б. С. Коньков (1938) на основе лизиметрических исследований испарения грунтовых вод в условиях выращивания люцерны пришел к выводу: «...величина испарения воды этим покровом зависела прежде всего от свойств его корневой системы».

На основании многолетних исследований испарения грунтовых вод на лизиметрических площадках гидрогеологических станций аридной зоны СССР в приборах с люцерной второго и третьего года посева установлено увеличение испарения грунтовых вод при увеличении мощности зоны аэрации, тогда как в установках с хлопчатником, оголенной почвенной поверхностью наблюдается снижение интенсивности испарения. Аналогичная зависимость устанавливается по результатам исследований в Закавказских республиках. Указанная особенность транспирационной способности люцерны при расчетах не учитывается, что может привести к существенному занижению величины расхода влаги на люцерновых полях с относительно глубоким залеганием грунтовых вод.

По данным лизиметрических исследований, при расчете испарения грунтовых вод необходимо учитывать влияние нормы орошения. В условиях слабого подземного оттока или практической бессточности большей части орошаемых земель Узбекистана в силу преобладания вертикального водообмена над горизонтальным режим орошения является определяющим. В зависимости от сроков и норм полива могут быть созданы условия, при которых испарение грунтовых вод даже при близком залегании (рисовые массивы или заболоченные земли) будет отсутствовать. В условиях же неглубокого горизонтального дренажа, малых поливных норм и при оптимальном использовании грунтовых вод как источника влаги, необходимой для выращивания той или иной технической культуры, испарение подземных вод может быть существенно увеличено по сравнению с обычными водохозяйственными условиями.

Анализ материалов лизиметрических наблюдений по хлопковой зоне СССР позволил установить существенную зависимость испарения грунтовых вод от температурных условий воздуха. В лизиметрах с оголенной почвенной поверхностью при повышении среднегодовых величин температуры воздуха интенсивность испарения возрастает.

Влияние температуры воздуха на интенсивность испарения ослабевает при увеличении мощности зоны аэрации.

Оценку типичности условий опытно-балансовых участков следует производить также, исходя из типичности условий рельефа, дренированности территорий. Дренированность наряду с искус-

ственными факторами зависит от рельефных условий, она существенно влияет на интенсивность испарения грунтовых вод. В вегетационный период на орошаемых землях грунтовые воды находятся вблизи от поверхности земли, уровни в межполивные периоды срабатываются под влиянием испарения и стока в дренажную сеть. Интенсивность сработки зависит от степени дренированности. На землях с хорошими дренажными условиями «пики» срабатываются за относительно короткий промежуток времени. На землях с необеспеченным подземным оттоком, слабо- или недренированных территориях максимальный горизонт грунтовых вод по сравнению с естественно-дренированными землями сохраняется дольше. Под влиянием специфичной динамики уровня грунтовых вод в плохо проницаемых грунтах в связи с замедленным дренированием создается своеобразный режим, который приводит к повышенному испарению на орошаемых землях по сравнению с территориями, находящимися вне зоны орошения.

Типичность условий опытно-балансовых участков должна основываться также на репрезентативности литологического строения зоны аэрации, т. е. строение грунтов на выбранном участке должно соответствовать условиям, имеющимся в регионе или в той его части, которая имеет большое народнохозяйственное значение и подлежит перспективному орошению. Иногда приводятся сведения о сходимости показаний, полученных в лизиметрах и по тепловому балансу, что также ошибочно, ибо в первом случае речь идет об испарении грунтовых вод без учета динамики влажности грунтов зоны аэрации, а во втором — о суммарном испарении, определяемом на основе баланса тепла в активном слое почвы. Несопоставимость этих цифр подтверждается и тем, что данные по лизиметрам получены при постоянном уровне грунтовых вод, а по тепловому балансу — при динамике зеркала подземных вод в полевых условиях.

Известно, что не вся влага, ушедшая с горизонта грунтовых вод, расходуется на испарение с почвенной поверхности, определенная часть остается в зоне аэрации для восполнения дефицита, возникшего из-за разности оттока, притока влаги. В летние месяцы в орошаемых районах Узбекистана ночное испарение превышает дневной расход влаги с уровня грунтовых вод, что объясняется значительным иссушением зоны аэрации за день и восстановлением запаса влаги в верхних частях зоны аэрации за ночь, когда испарение с почвенной поверхности незначительно или равно нулю. Ночное испарение с зеркала грунтовых вод зависит от мощности зоны аэрации.

В общем испарении с почвы участие грунтовых вод варьирует от 80% при мощности зоны аэрации 0,5 *м* до 0,3% при 3,0 *м*. В целом наблюдается снижение доли участия грунтовых вод в испарении при увеличении мощности зоны аэрации.

Доля испарения грунтовых вод зависит от климатической увлажненности: с увеличением коэффициента увлажненности она

снижается. Так, при мощности зоны аэрации 1,0 *м* доля испарения грунтовых вод в Муганской степи составляет 46,2; Вахшской долине — 48,0; Голодной степи — 65,1; Чарджоу — 71,6; Шерабадской степи — 74,2.

В лизиметрах с люцерной второго и третьего года посева доля участия грунтовых вод в общем испарении с дневной поверхности выражена специфично, наблюдается значительное участие грунтовых вод в испарении даже при мощности зоны аэрации 3,0 *м*.

В Бухаре испарение грунтовых вод при глубине залегания 2,0—3,0 *м* от поверхности земли составляет 15,9—73,5% от общего испарения с дневной поверхности.

РАЙОНИРОВАНИЕ ХЛОПКОВОЙ ЗОНЫ СССР ПО ВЕЛИЧИНЕ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

По результатам многолетних лизиметрических исследований установлены зависимости испарения от литологического строения грунтов зоны аэрации, вида растительного покрова и глубины залегания подземных вод. На основе данных опытно-балансовых участков в каждом регионе (рис. 22) определены величины испарения грунтовых вод с оголенной почвы и естественной растительности для каждой литологической разности грунтов. Затем с использованием переходных коэффициентов от данных лизиметров с естественной растительностью к испарению грунтовых вод в приборах с хлопчатником и люцерной первого года посева рассчитаны величины испарения.

Грунты выделены в трех разновидностях со следующим механическим составом: 1) тяжелым — глины и суглинки; 2) средним — супеси; 3) легким — пески и галечники с песком и гравием.

Карта испарения грунтовых вод хлопковой зоны СССР строилась с выделением горного обрамления, останцовых горных возвышенностей и выходов коренных пород на дневную поверхность, а также равнинных пространств (предгорные равнины, межгорные впадины, дельтовые и песчаные равнины).

Основой для построения карты испарения явились схемы литологического состава пород зоны аэрации и глубин залегания грунтовых вод. Необходимо отметить, что для всего изучаемого района имелись карты по отдельным участкам в различных масштабах. Поэтому геологическую и гидрогеологическую основу мы создали путем пантографирования карт различного масштаба на различные сроки. Таким образом, карта глубин залегания грунтовых вод, составления по данным режимных наблюдений и съемочных работ, относящихся к различным периодам, не характеризует определенный период или дату, но в целом представляет среднегодовой уровень грунтовых вод на изучаемой площади. На гидрогеологической карте мы выделили следующие глубины:

0—3 *м*, 0—1; 1—2; 2—3; 3—5; 5—10 *м* и более, что в основном соответствует испытываемым в лизиметрических установках.

Для построения карты испарения мы не пользовались градацией более 10 *м*, считая, что при этом отсутствует испарение с переходом в атмосферу, но может наблюдаться внутригрунтовое испарение.

Методика построения карты испарения грунтовых вод хлопковой зоны СССР заключается в следующем. На совмещенную литологическую и гидрогеологическую основу наносятся в основном пункты с длительным периодом режимных наблюдений, а также скважины со съемочных работ. Кроме того, точки пересечения

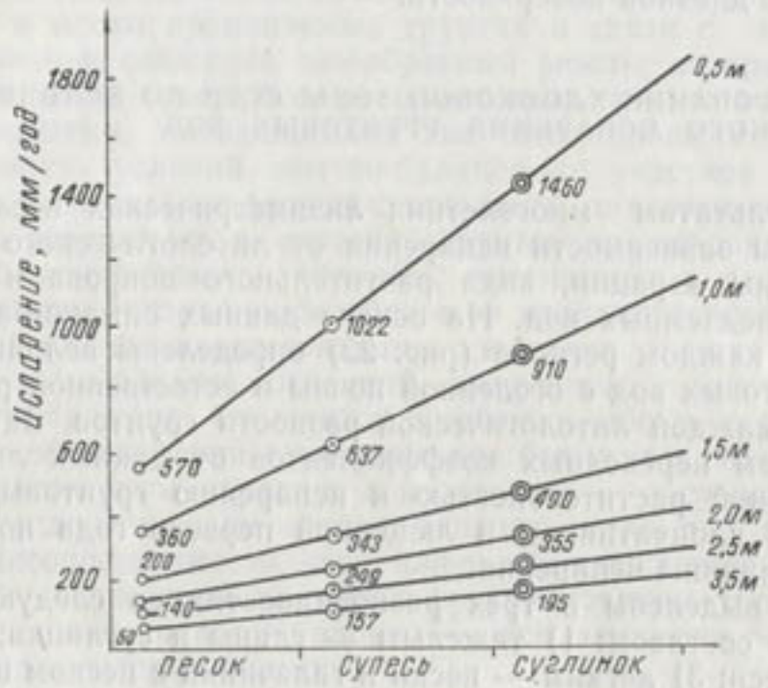


Рис. 22. Зависимость испарения грунтовых вод от литологических разностей пород при разной мощности зоны аэрации.

контуров глубин и литологических разностей пород принимаем как расчетные с определенной характеристикой мощности и литологического строения зоны аэрации.

Для скважин и точек определялась величина испарения по данным лизиметров с естественной растительностью, а для орошаемых земель дополнительно рассчитывалось испарение грунтовых вод в условиях выращивания хлопчатника и люцерны первого года посева. У каждой точки указывались средняя глубина залегания грунтовых вод, индекс литологической разности пород и величина испарения. Пользуясь найденной точечной характеристикой и интерпретацией, величину испарения грунтовых вод на карте изображали в изолиниях равного испарения отдельно; в условиях роста естественной растительности (получались характеристики испарения без орошения); роста хлопчатника и люцерны первого года посева (показывалась интенсивность испарения грунтовых вод в условиях орошения и действия технических культур на процесс испарения грунтовых вод).

На рис. 23 изолинии проведены со следующими значениями: 100, 300, 500, 700, 900, 1100 и 1300. В случаях сгущения контуров изолинии проведены через два и три интервала.

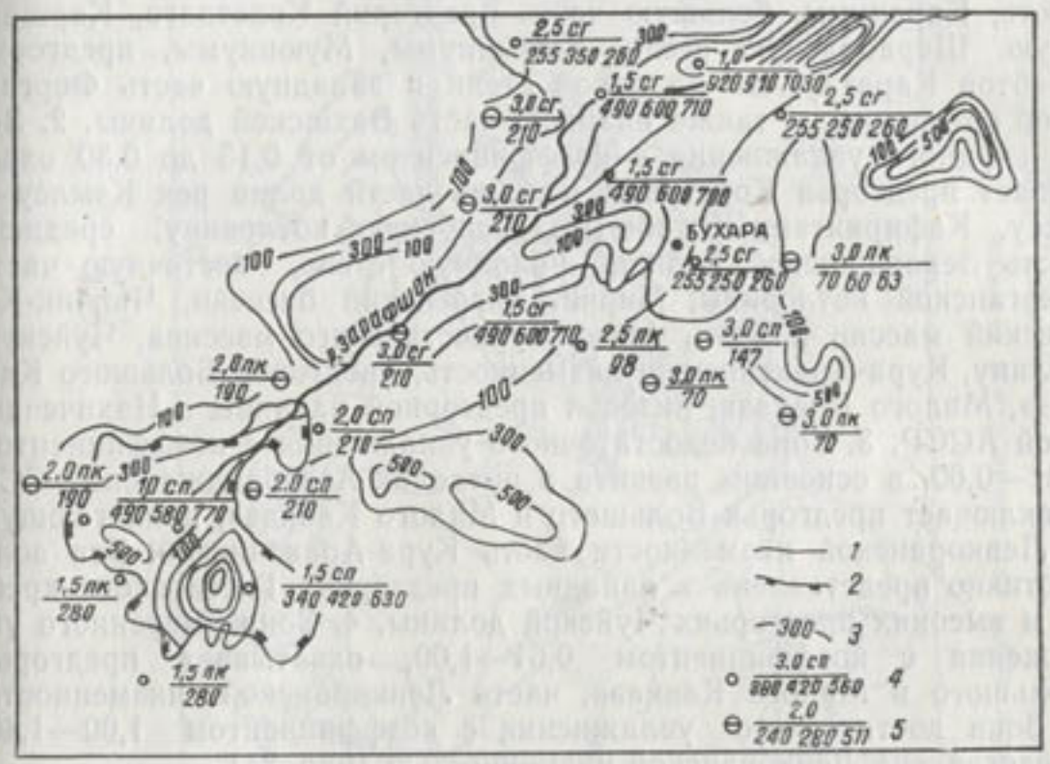


Рис. 23. Карта испарения грунтовых вод, составленная для Бухарского и Каракульского оазисов (1973 г.)

1—границы орошаемых территорий; *2*—изолинии равного испарения в условиях естественной растительности; *3*—скважины (картировочные, режимные), принятые для расчета; *4*, *5*—расчетные точки (точка пересечения контурных линий литологических разностей грунтов и глубин залегания грунтовых вод). Цифры на изолиниях—величина испарения грунтовых вод (*мм/год*) у расчетных точек и скважин, в числителе—глубина залегания грунтовых вод, индекс литологических разностей пород (песок—Пк, супесь—Сп, суглинок—Сг); в знаменателе—величина испарения грунтовых вод с естественной растительностью, хлопчатником, люцерной первого года посева, *мм/год*.

На основании установленных зависимостей, коэффициентов и карты испарения мы приступили к районированию хлопковой зоны СССР по величине суммарного испарения грунтовых вод, которое является типологическим. За основу приняты карты литологического состава грунтов зоны аэрации, глубин залегания и испарения грунтовых вод.

Мы приняли следующую таксономическую схему: провинции, области, районы, подрайоны, участки.

Провинции выделены по особенностям геоморфологических условий: горы, адырные предгорья, предгорная равнина, дельто-

вая равнина, останцовые горы, песчаная равнина, каждая характеризуется своими особенностями строения и образования рельефа.

Области установлены исходя из особенностей климата, естественной увлажненности и сухости. За основу мы приняли климатические зоны увлажненности (по Н. И. Иванову), впервые закартированные нами в 1973 г.: 1. Зона ничтожного увлажнения $K \leqslant 0{,}12$, включает Бакинскую мульду, Прикаспийскую низменность, Каракумы, большую часть предгорий Копетдага, Каршинскую, Шерабадскую степи, Кызылкумы, Муюнкумы, предгорья хребтов Каратау, юг Голодной степи и западную часть Ферганской котловины, а также нижнюю часть Вахшской долины. 2. Зона скудного увлажнения с коэффициентом от 0,13 до 0,30 охватывает предгорья Копетдага, верхние части долин рек Кзылсу—Яхсу, Кафирниган, Китабо-Шахрисябскую котловину, среднюю часть Зеравшанской долины, Голодную степь, восточную часть Ферганской котловины, Чирчик-Ангренский бассейн, Чирчик-Келесский массив и часть Арысь-Туркестанского массива, Чуйскую долину, Кура-Араксинскую низменность, предгорья Большого Кавказа, Малого Кавказа, низовья предгорной равнины в Нахичеванской АССР. 3. Зона недостаточного увлажнения с коэффициентом 0,31—0,60, в основном развита в пределах Азербайджанской ССР и включает предгорья Большого и Малого Кавказа, прилегающую к Ленкоранской низменности часть Кура-Араксинской. Эта зона частично представлена в западных предгорьях Гиссарского хребта и высоких предгорьях Чуйской долины. 4. Зона умеренного увлажения с коэффициентом 0,61—1,00, охватывает предгорья Большого и Малого Кавказа, часть Ленкоранской низменности. 5. Зона достаточного увлажнения с коэффициентом 1,00—1,40, представлена Ленкоранской низменностью (рис. 24).

Необходимо отметить, что высокогорные районы Средней Азии и области распространения ледников характеризуются коэффициентами, свойственными зонам умеренного и достаточного увлажнения.

Районы выделены по интенсивности испарения грунтовых вод. При установлении градаций принята нами за наиболее увлажненный регион Кура-Араксинская низменность, наивысшее значение годовой суммы испарения грунтовых вод брали за верхний предел, таким пределом оказались 700 *мм/год* (лизиметры с естественной растительностью).

По величине испарения грунтовых вод *(мм/год)* выделены следующие районы:

весьма интенсивного — 700 и более;
интенсивного — 500—700,
умеренного — 300—500,
слабого — 100—300,
весьма слабого — менее 100.

В зоне ничтожного увлажнения предгорных равнин представлены все районы интенсивности испарения грунтовых вод, так

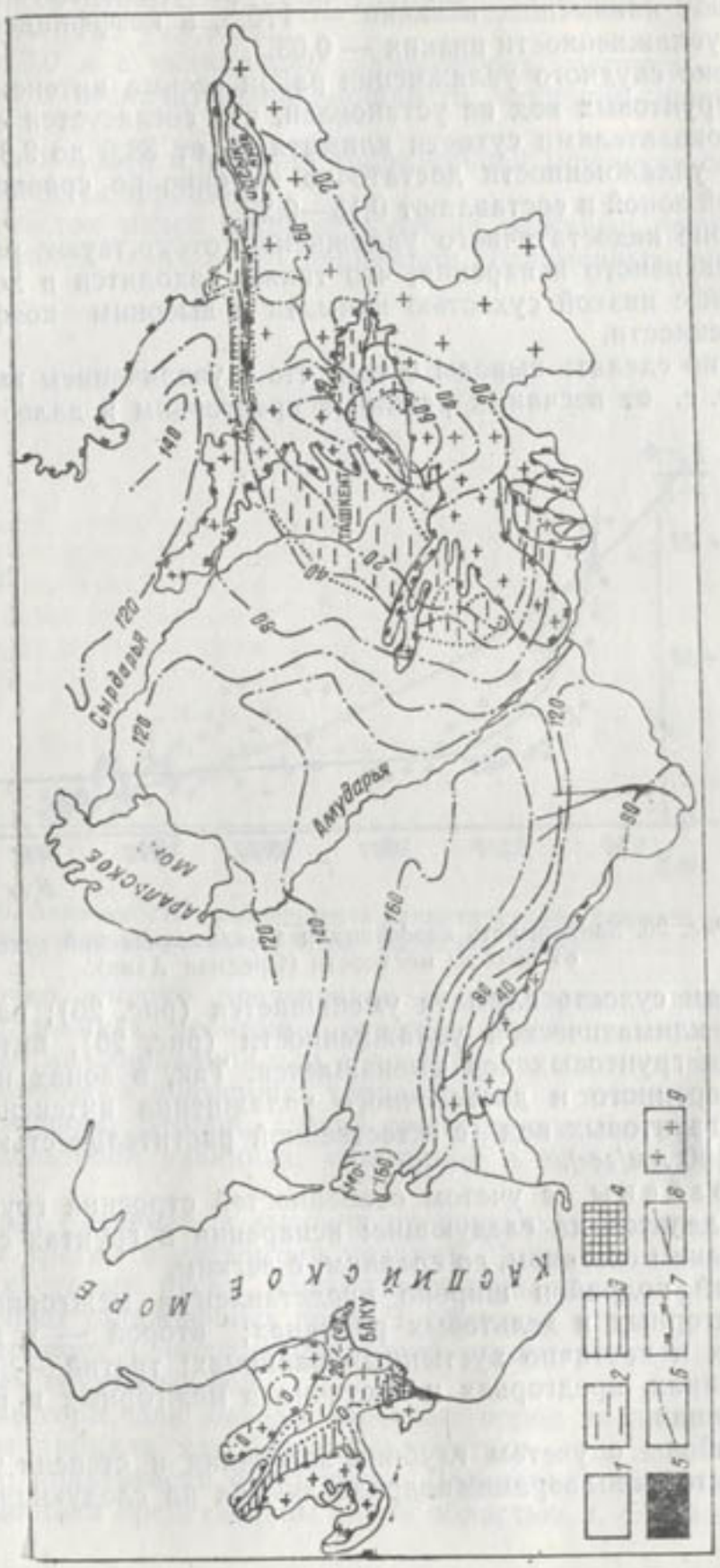


Рис. 24. Карта климатической увлажненности и сухости:

Климатические зоны увлажнения: *1*—ничтожного, *2*—скудного, *3*—недостаточного, *4*—умеренного, *5*—достаточного; *6*—изолинии равной сухости; *7*—контур горного обрамления; *8*—реки; *9*—горы.

как здесь среднемноголетние значения сухости климата наибольшие, достигают наивысших величин — 175,3, а коэффициент климатической увлажненности низких — 0,03.

В зоне скудного увлажнения район весьма интенсивного испарения грунтовых вод не установлен, что согласуется с более низкими показателями сухости климата — от 38,0 до 2,3, а коэффициенты увлажненности достаточно высокие по сравнению с предыдущей зоной и составляют 0,13—0,29.

В зоне недостаточного увлажнения отсутствуют районы весьма интенсивного испарения, что также находится в хорошей взаимосвязи с низкой сухостью климата и высоким коэффициентом увлажненности.

Можно сделать выводы о том, что с увеличением высоты местности, т. е. от песчаных равнин к предгорьям и далее к высоким

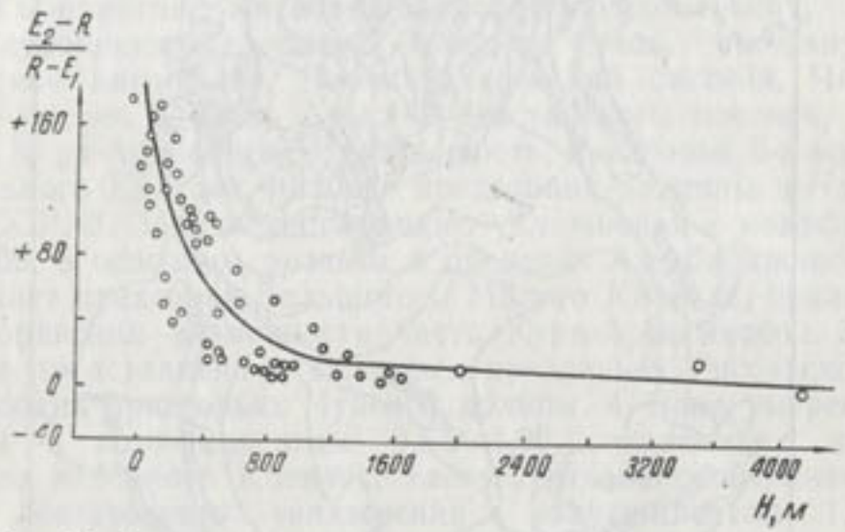


Рис. 25. Зависимость коэффициента климатической сухости от высоты местности (Средняя Азия).

предгорьям сухость климата уменьшается (рис. 25); растет коэффициент климатической увлажненности (рис. 26), интенсивность испарения грунтовых вод уменьшается. Так, в зонах недостаточного, умеренного и достаточного увлажнения интенсивность испарения грунтовых вод (с естественной растительностью) не превышает 500 *мм/год*.

Подрайоны с учетом особенностей строения грунтов зоны аэрации делятся на следующие: испарения в грунтах с тяжелым механическим составом, со средним, с легким.

Первый подрайон широко представлен в межгорных впадинах, предгорных и дельтовых равнинах; второй — в прегорьях, дельтовых и частично пустынных равнинах; третий — в пустынных равнинах, предгорьях и частично в межгорных и внутригорных впадинах.

Подрайоны с учетом глубины залегания и степени увлажненности грунтов зоны аэрации подразделяются на следующие участки:

испарения грунтовых вод при глубине залегания от 0,0 до 1,0 *м* с заболоченных участков;

от 1,0 до 3,0 *м* с капиллярно увлажненных участков;

3,0—5,0 *м* и незначительной мощности воздушно-сухого слоя грунтов;

5,0—10,0 *м* и более и наличии значительной мощности воздушно-сухого слоя зоны аэрации.

Первый участок менее распространен на песчаных равнинах и представлен узкой полосой по периферии современных озер, мо-

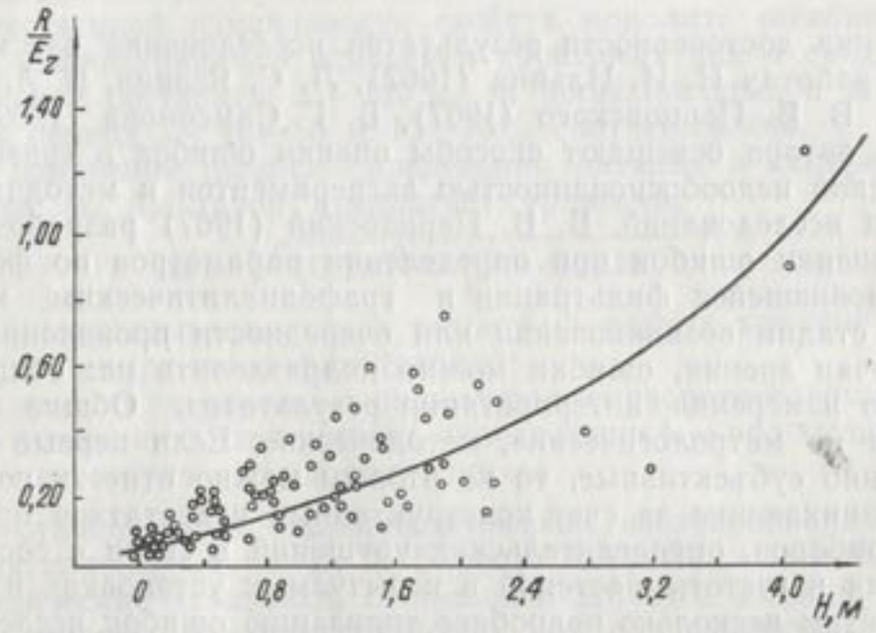


Рис. 26. Зависимость коэффициента климатической увлажненности от высоты местности (Средняя Азия).

рей. Достаточно широко представлен в межгорных впадинах, внутригорных долинах, дельтовых равнинах и находится главным образом в зоне выклинивания или сброса поверхностных избыточных вод и частично в пойменных террасах рек, а также в естественных понижениях. Второй, третий участки широко развиты в предгорной, дельтовой равнинах, межгорной и внутригорной впадинах.

На песчаных равнинах, в высоких предгорьях в основном широко развиты третий и четвертый участки. Лишь на солончаках, в понижениях старых русел, наблюдается испарение грунтовых вод с капиллярно увлажненных почв. В основном территория пустынных пространств и высоких предгорий характеризуется глубоким залеганием грунтовых вод.

Останцовые горы, или выходы коренных пород на дневную поверхность, мы приняли как безводные участки, где испарение грунтовых вод практически отсутствует. Дельтовые песчаные равнины как провинции представлены одной областью, т. е. зоной нич-

тожного увлажнения, которая характеризуется значительной сухостью климата, минимальным коэффициентом увлажненности. В указанных провинциях представлены все выделенные районы по интенсивности испарения грунтовых вод.

Орошаемые оазисы Азербайджанской ССР, расположенные в зоне со сравнительно высокой степенью климатического увлажнения, характеризуются менее интенсивным процессом испарения грунтовых вод по сравнению со Среднеазиатскими республиками.

ТИПИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА ОШИБОК

Оценка достоверности результатов исследований рассматривается в работах Н. И. Ильина (1967), Л. С. Язвина, В. А. Барона (1974), В. В. Перцовского (1967), Б. Г. Самсонова (1969). Три первых автора освещают способы оценки ошибок в связи с теоретической недообоснованностью экспериментов и методикой проведения исследований. В. В. Перцовский (1967) разработал способы оценки ошибок при определении параметров по формулам неустановившейся фильтрации и графоаналитическим методом.

По стадии возникновения или очередности проявления, с нашей точки зрения, ошибки можно подразделить на: общие, единичного измерения, интерпретации результатов. Общие ошибки делятся на метрологические, методические. Если первые преимущественно субъективные, то ко вторым можно отнести погрешности, возникающие за счет конструктивных недостатков применяемых приборов, определительских упущений в связи с состоянием развития и густоты растений в испытуемых установках и др.

Осветим несколько подробнее типизацию ошибок исследования гидрогеологических параметров. Л. С. Язвин указывает, что подобно тому, как геофизики в электроразведке определяют кажущееся электрическое сопротивление, гидрогеологи во многих случаях определяют кажущиеся гидрогеологические параметры.

Н. Н. Ильин (1967) выделил две группы ошибок, определяющих точность расчета единичного значения параметра водопроницаемости — метрологические и методические. Первые, по мнению автора, вызваны неточностью измерения глубины и диаметра скважины, дебита и понижения уровня при откачке и т. д. Методические ошибки возникают при: а) использовании расчетных формул, полученных линеаризацией нелинейных уровней фильтрации; б) применении уравнений связи установившейся фильтрации с неустановившейся; в) трудностях в оценке природной обстановки. Третья группа ошибок связана с результирующей оценкой водопроницаемости массива горных пород, т. е. представляет ошибки осреднения.

В. А. Барон (1974) считает, что точность определения гидрогеологических параметров обусловливается неоднородностью исследуемых пород, методическими и метрологическими ошибками. Метрологические ошибки, по его мнению, как правило, носят случайный характер и с помощью методов математической статистики могут быть пронивелированы и учтены. Методические вызваны двумя группами факторов — недостаточно строгими теоретическими основами рассматриваемых методов и неправильным выбором методики обработки. Относительно влияния неоднородности исследуемой среды в связи с изменчивостью свойств монолита В. А. Барон указывает, что пространственная изменчивость определяет большую дисперсию результатов наблюдений в различных климатических зонах в зависимости от сезона года и абсолютной величины измеряемого элемента баланса. Только за счет естественной изменчивости свойств монолита ошибки определения инфильтрации и испарения грунтовых вод в среднем за месяц могут составить 20—120%, за вегетационный и невегетационный период — 10—30 и 10—76% соответственно.

Для измерения ошибки определения питания и испарения в лизиметре В. А. Барон предлагает уравнение

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{(0.1n)^2 + [(7 \div 12)\Delta h]^2}, \qquad (65)$$

где n — количество циклов за расчетный период времени — смена испарения инфильтрацией;

Δh — изменение уровня в лизиметрах за расчетное время;

$7 \div 12$ — зависимость от точности определения μ — водоотдачи или недостатка насыщения грунтов.

При стационарных гидрогеологических исследованиях на балансовых площадках (по В. А. Барону) могут быть использованы лизиметрические установки, с помощью которых должны наблюдаться элементы баланса грунтовых вод с трехкратной повторностью в аридной зоне и четырехкратной — в гумидной. При этом будут получены результаты с ошибкой, не превышающей 10—25% при 50% обеспеченности. Если повышать обеспеченность до 80—95%, то кратность опробования должна быть увеличена до шести и более.

В. В. Перцовский (1967) выделяет следующие группы ошибок единичного определения:

систематические, которые он подразделяет на:

1) инструментальные, связанные с неправильностью измерительной аппаратуры;

2) обусловленные наличием факторов, осложняющих проведение опыта (переменный приток, наличие газа, сопротивление в трубах и призабойной зоне скважины и т. д.);

3) полученные в результате неверной схематизации гидрогеологических условий при определении конфигурации и характера границ в плане и разрезе;

4) теоретические, связанные с некоторыми допущениями или упрощениями используемых аналитических зависимостей;

5) субъективные погрешности — следствие некоторых индивидуальных свойств наблюдателя.

Наиболее важными причинами случайных являются ошибки измерения и функциональная связь опытных данных с параметрами пласта, геологическая неоднородность пласта.

Метрологические ошибки, по В. В. Перцовскому, определяются по формуле (66)

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\sigma x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\sigma x_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\sigma x_n\right)^2}, \quad (66)$$

где σ — среднеквадратичная ошибка функции;
σx_1, σx_2, σx_n — среднеквадратичные ошибки аргументов.

Б. Г. Самсонов (1969) ошибки, возникающие при определении параметров по формулам неустановившейся фильтрации графоаналитическим методом, подразделяет на две группы:

1) ошибки, связанные с техникой проведения и обработки результатов (опытно-методические);

2) ошибки, связанные с интерпретацией экспериментальных закономерностей понижения (восстановления) уровня интерпретации. При выводе среднеарифметического значения параметров водно-солевого баланса они неизбежно содержат погрешности.

По В. Е. Райнину, погрешностью (ошибкой) называется величина, ограничивающая возможную изменчивость составляющей баланса

$$X = x \pm \Delta X, \quad (67)$$

где X — точное значение величины;
x — значение той же величины, полученной из опыта;
ΔX — абсолютная погрешность
или

$$X = (1 \pm \delta x)\, x, \quad (68)$$

где δx — относительная погрешность в долях единицы, равная

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{X}. \quad (69)$$

В практике воднобалансовых исследований используют понятие средней абсолютной погрешности $\Delta x_{ср}$

$$\Delta X_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i) \quad (70)$$

и средней квадратической ошибки (стандартной)

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^2}{n}}, \quad (71)$$

где n — число отдельных значений, при $n=30$ вместо n принимается $n-1$.

Абсолютную ошибку в определении испарения грунтовых вод можно рассчитать по уравнению

$$\Delta i = y_i - \overline{y}_p, \quad (72)$$

где Δ_i — абсолютная ошибка;
y_i — значение испарения;
$\overline{y}_p$ — среднее значение испарения.

Относительная ошибка определяется из уравнения

$$\Delta x = \frac{y_i - \overline{y}_p}{\overline{y}_p} \cdot 100 \quad (73)$$

и выражается в процентах.

При нормальном распределении членов вариационных рядов величину относительной ошибки можно вычислить по уравнению Е. И. Гурского (1971)

$$S_x = \frac{\sigma \cdot 100}{\sqrt{n \cdot x}}, \quad (74)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение;
n — число определений;
x — среднее арифметическое значение.

Попытки расчета относительной ошибки лизиметрических наблюдений по данному уравнению не привели к желаемым результатам. Уравнение применяется и дает хорошие результаты для данных с достаточно длительным рядом наблюдений — 50 лет и более. Обработка данных по опытно-балансовым участкам Узбекистана с 1951 по 1972 г. с использованием уравнения Е. И. Гурского показала большие отклонения величин относительной ошибки лизиметрических данных — от 2,6 до 246,0%.

А. И. Зайдель (1967) классифицирует ошибки на промахи, случайные и систематические. Для характеристики величины случайной ошибки он предлагает определить доверительный интервал и доверительную вероятность: средней квадратичной ошибке σ соответствует доверительная вероятность 0,68; удвоенной среднеквадратичной ошибке 2σ — доверительная вероятность 0,95.

ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ФОНОВОЙ ПЛОЩАДИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опытно-балансовые участки на орошаемых землях размещаются без учета эффекта трансформации воздушной массы, влияние которого, особенно на границе возделываемого поля с неорошаемым массивом, ощутимо. Согласно проработкам С. И. Харченко (1967), комплексный параметр суммарного испарения по профилю движения воздушных масс

$$a = ZE/R$$

увеличивается с 0,4 до 1,9 за счет повышения затрат тепла на испарение ZE и изменения радиационного баланса деятельной поверхности R. Параметр a, характеризующийся значительными изменениями у края орошаемого поля на расстоянии до 100 *м* и при углублении до 200 *м* и далее, является стабильным.

А. П. Вершинин (1969) на основании исследований, проведенных на орошаемых полях, пришел к выводу о том, что расстояние, на котором влияние адвекции отсутствует полностью, можно оценить примерно в 400—500 *м*. Оптимальные размеры фоновой площади при закладке метеорологических станций определяются не менее 30-кратной высоты растительного покрова природной или искусственной преграды на пути воздушной массы: чем больше высота, тем больше расстояние от края поля до репрезентативной точки. По В. В. Рогоцкому (1972), для орошаемых полей Северного Кавказа и Южного Казахстана расстояние от наветренного края поля, на котором испарение можно рассчитывать по формулам, составляет 200 *м*.

И. Г. Горбунова, Л. П. Серякова (1975) указывают на трансформацию воздушных масс как на основной процесс, определяющий микроклимат орошаемых полей в степях и полупустынях Средней Азии и Южного Казахстана. По их данным, понижение температуры и повышение влажности на деятельной поверхности орошаемого поля по сравнению с пустыней весьма значительно и составляет в среднем 3—5° и 4—6 *мб*.

С. И. Харченко (1973), А. С. Субботин (1976), П. В. Тищенко (1976) отмечают, что отличие фоновых условий приводит к увеличению радиационного баланса на 15—20%, пропорционально возрастает и испарение.

Если вышеприведенные факты и их последствия можно объяснить главным образом внешними причинами по отношению к орошаемому полю, то можно выделить и внутренние, оказывающие влияние на микроклимат. По результатам многолетних исследований радиационного баланса и его составляющих на хлопковом поле (Муминов, 1970), можно утверждать о формировании здесь микроклимата, который определенным образом влияет на развитие самого растения и в конечном счете на урожайность. Темпы развития хлопчатника более тесно связаны с термическим режимом воздуха зоны обитания растительного покрова, чем с температурой на уровне 2 *м* от поверхности земли.

Результаты специальных исследований подчеркивают необходимость учета эффекта трансформации воздуха, особенностей влияния микроклимата на процесс испарения. Поскольку суммарное испарение с орошаемых полей формируется под влиянием грунтовых вод наряду с другими водохозяйственными условиями, то при организации экспериментальных работ необходимо учитывать микроклиматические особенности орошаемых полей, и место расположения лизиметрических площадок должно быть удалено на 100—200 *м* от края поля. Если размеры сторон карты

не позволяют выполнить эти условия, то экспериментальная площадка должна быть выбрана в центре.

Следует отметить, что из 19 лизиметрических площадок, действовавших в период 1966—1971 гг. в хлопковой зоне СССР, только четыре соответствовали условиям оптимальности фона: «Буйрак» в Ферганской котловине, «Бешкент» в Каршинских степях, «Бирлик» в Муюнкумах, «Восе» в Южном Таджикистане.

Лизиметрическая площадка «Буйрак», хотя и расположена в центре орошаемого поля, оказалась в условиях наилучшего обеспечения дренированности, поскольку она расположена на участке, относительно приподнятом по сравнению с окружающими поливными землями.

Несоответствие фоновых условий требуемым размерам выбранного участка орошаемых земель в большинстве случаев зависит от понимания важности и народнохозяйственной значимости результатов намечаемых экспериментов и решения представителей колхозов и совхозов, которым переданы в аренду земельные участки. В некоторых случаях представители исследовательских организаций, производственных подразделений, руководствуясь соображениями наивысшей экономичности геологоразведочных работ, удобства транспортировки, средств связи и обеспеченности кадрами, недооценивают научно-методическую обоснованность экспериментов, что приводит к нежелаемым последствиям и не обеспечивает требуемого качества ожидаемых результатов исследований.

НОЧНОЕ ИСПАРЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Х. Зарадный и Ю. Шутор (1973) отмечают, что именно в приповерхностном слое почвенного профиля термические градиенты могут быть значительно выше и для таких случаев решающим окажется приток влаги, вызванный градиентом температуры. В определенных условиях градиент температуры будет увеличивать, в других — уменьшать течение влаги в ненасыщенной среде.

По данным Ф. А. Муминова (1970), за вегетационный период на хлопковых полях ночью формируется градиент температуры в почве, который колеблется от —0,3 до —1,4 *град/см* в слое 0—5 *см;* от 0,2 до 0,4 в слое 5—10 *см;* от 0,1 до —0,2 в слое 10—15 *см;* от 0,0 до —0,1 *град/см* в слое 15—20 *см* от поверхности земли. Суточные амплитуды колебания температуры почвы за этот период достигают 39,3°С на поверхности почвы; 16,3°—на глубине 5 *см;* 10,2° — 10 *см;* 6,2°—15 *см;* 3,9°—20 *см*.

По данным наблюдений в лизиметрах, разница между температурой почвы на глубине 5 и 300 см по среднемесячным значениям в середине вегетационного периода изменяется от 13,8 до 21,6°С.

Отрицательные ночные (по данным на 0 часов) градиенты температуры почвы в самые жаркие месяцы значительные, амплитуда колебания температуры почвы в слое 0—20 *см* и 5,0—300 *см*, с нашей точки зрения, достаточное подтверждение воз-

можности значительного испарения грунтовых вод ночью в слое, подвергающемся значительному иссушению за светлый период суток.

С. В. Нерпин и А. Ф. Чудновский (1975) указывают, что в ночной период до «включения» растением механизма транспирации в пределах области питания корневого волоска влажность и ее потенциал выравниваются. В этот период на периферии области влажность понижается, а во внутренней части, у корневого волоска, повышается. В связи с этим возможно допущение усиленного подсоса влаги с зеркала грунтовых вод в зону активного развития корней и капиллярной влажности.

Необходимо отметить, что накопление в приповерхностном слое будет зависеть от гистерезиса распределения влаги и всасывающего давления в грунтах. Во время полива и в межполивные периоды влага в грунте существенно перераспределяется по профилю.

Следует обратить внимание еще на сроки наблюдений за лизиметрами. Обычно ночное испарение определяется по замерам в 21 час вечера и 7 часов утра. Было бы методически оправданным определять сроки наблюдений сообразно с действительным началом радиации солнца и завершением его. При существующем методе в начале вегетационного периода ночное время субъективно укорачивается, а в конце удлиняется. Е. Мишна (1964) констатирует, что «...применяемые на практике временные интервалы, определяющие ночное испарение в период от 21 до 7 часов, являются искусственными». Они не соответствуют ни фактической продолжительности ночи, ни являются симметричными в отношении полудня и полуночи. Наиболее целесообразны измерения в момент захода и восхода солнца.

Это трудно учесть в производственных условиях, но с научной точки зрения заслуживает несомненного одобрения, ибо процесс испарения главным образом определяется притоком солнечной энергии при второстепенном значении всех остальных источников.

ГЛАВА IV

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСОВ ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ И НЕКОТОРЫЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Одним из первых законов инфильтрации является закон Грина и Эмпта (1911), согласно которому скорость впитывания выражается

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{K_\Phi (H_0 + l - Hf)}{l}, \qquad (75)$$

или

$$\frac{d\Theta}{dt} = A + \frac{B}{l}, \qquad (76)$$

где $A = K_\Phi$, $B = K_\Phi (H_0 - H)$, K_Φ — влагопроводность;
H_0 — гидростатический напор, или слой воды на поверхности почвы;
l — путь инфильтрации (глубина промачивания);
Hf — давление воздуха в почве.

Х. Морел-Сейтоу и Д. Кенджи (1974) пришли к выводу о том, что параметры A и B в уравнении (76) обладают чрезвычайно точным физическим значением. Однако предположение «крутизны», отделяющей зону насыщения от зоны с внутренним содержанием воды, может привести заведомо к ошибкам порядка 10—70%, поэтому необходимо ввести поправочный коэффициент β.

Первые систематические исследования в Советском Союзе плоской задачи теории установившейся фильтрации принадлежат Н. Е. Жуковскому и Н. Н. Павловскому (1922—1923 гг.).

Скорость инфильтрации зависит от слоя инфильтрующейся воды на поверхности земли, влажности почвы, гидравлической проводимости, напора почвенной влаги, длины пути инфильтрации.

Букингем первым предположил, что скорость движения воды в ненасыщенной почве может быть пропорциональна градиенту «капиллярного потенциала» почвенной воды. В его системе обозначения

$Q = \lambda \frac{\partial \psi}{\partial x}$ — поток (приток) на каждую единицу площади,

ψ — капиллярная проводимость,

λ — капиллярный потенциал.

Кроме того, он записал свое уравнение в значениях градиента содержания воды:

$$Q = \lambda \left(\frac{\partial \psi}{\partial Q}\right)\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right), \qquad (77)$$

которое предполагает взаимосвязь между содержанием и потенциалом воды.

Для потока, проходящего через капилляры, Грин и Эмпт вывели несколько уравнений движения воды в почву.

Для вертикальной инфильтрации в почву:

$$(P/S)\,t = l - (a + K) \cdot \mathrm{en}\,[1 + l/(a + K)], \qquad (78)$$

где P — коэффициент проницаемости;

S — пористость;

t — время;

l — глубина просачивания воды;

a — высота воды на поверхности почвы;

K — капиллярный потенциал увлажнения грунта.

Для горизонтального движения воды:

$$(PK/S)\,t = l^2/2\,. \qquad (79)$$

K в этом случае является потенциалом, при котором заполняются средние поры.

Ж. Ф. Деан и Ж. Ваше (1971) отмечают, что на механизм инфильтрации воздействуют два основных параметра: с одной стороны, объемное содержание воды — V, с другой — отсасывание ψ. Последняя величина связана с давлением водной и воздушной фаз следующей зависимостью:

$$\psi = \frac{P_{eau} - P_{air}}{P\frac{q}{V}}. \qquad (80)$$

По Д. Парлангу (1975), общим уравнением, определяющим движение воды под влиянием капиллярности и гравитации, является:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \Delta\,(D\Delta\Theta) - \frac{dK}{d\Theta}\frac{\partial \Theta}{\partial z}, \qquad (81)$$

где Θ — влагосодержание;

t — время;

z — вертикальная координата, положительная вниз;

D — диффузия;

K — проницаемость.

В. Орпен (1971) отмечает, что естественное питание подземных вод регулируется такими переменными факторами, как рельеф, тип почвенного покрова и его мощность, густота растительного покрова, проницаемость подстилающих пород, количество и интенсивность осадков.

Оулмен, Бернс и Бауман обосновали водородные связи между увлажненными частицами. Согласно Г. М. Робинсону (1968), силы адсорбции и водородной связи очень малы и составляют 4,5 *ккал/моль* по сравнению со средней энергией, ковалентной связи порядка 80 *ккал/моль*. Он считает, что на проникновение осадков вглубь действует удерживающая сила, или сила поверхностного натяжения:

$$V_{sv} = V_{se} + V_{ev}\cos\Theta, \qquad (82)$$

где V — поверхностное натяжение;

Θ — контактный угол;

s, e, v — твердая, жидкая и газообразная фазы соответственно.

Для того, чтобы внедриться в поверхностную пленку частица фильтрующейся воды должна преодолеть адгезионное давление, умноженное на поверхность частицы грунта. Во время фильтрации на частицу осадка действуют силы адсорбции, трения (пропорциональная скорости воды) и тяжести на частицу.

$$F_g = (d - d_0)\,g,$$

где $d - d_0$ — эффективная масса частицы,

g ускорение силы тяжести.

По данным Макфорлона и Табора (Робинсон, 1968), сила адгезии повышается с увеличением поверхностного натяжения (табл. 49). В чистом сухом воздухе адгезия между твердыми поверхностями становится малозаметной, в то время как во влажном — повышена.

Инфильтрация воды в грунт зависит от влажности почвы, с которой связано распределение всасывающего давления грунтов зоны аэрации. Если обратиться к исследованиям Деан и Ваше (1971), то можно установить, что при размокшей почве в дождливый период колебание запасов влаги, с одной стороны, слабо, а с другой — мало различается с глубиной. Осадки перемещаются в глубь почвы, причем одинаково на всех отметках. Возможности запаса воды непосредственно в транзитной зоне невелики.

Согласно данным К. П. Лундина (1968), осадки, проникающие в торфяную почву и расходуемые на пополнение продуктивных влагозапасов, могут быть оценены в первом приближении в 70—85% от общего их количества за вегетационный период.

Глубина промачивания песчаных грунтов, по данным М. Ишанкулиева (1975), на Репетекском заповеднике Каракумов в зависимости от условий года, в межкроновых пространствах саксаула колеблется от 35 до 150—200 *см;* на подкроновых пятнах — от 15 до 100—150 *см*.

Влага в почве распределяется в зависимости от ряда факторов, к которым, по Ю. Б. Текучеву (1975), отнесены географическая зональность, рельеф и микрорельеф, экспозиция, атмосферные осадки, температура воздуха и грунта, влажность воздуха, минералогический состав пород, гранулометрический состав, пластичность, структура, глубина залегания грунтовых вод, тип подстилающих горизонтов, исходная влажность. К определяющим условиям распределения влаги можно отнести норму и режим полива, промывок, интенсивность дренажа, влияние деятельного покрова (растительность), особенности развития корневой системы, агротехнические мероприятия, глубину вспашки, поверхностно активные вещества, способ орошения и т. д.

Географическая зональность в комплексе гидрогеологических условий, увлажненности и притока солнечной энергии влияет на определенную площадь. Известно, что на европейской территории Союза влажность грунтов уменьшается с северо-запада на юго-восток. При одинаковой глубине залегания подземных вод в ложбинах с большим расчленением грунты зоны аэрации характеризуются высокой влажностью, а в менее расчлененных благодаря большой мощности зоны аэрации — низкой. Слаборазвитый микрорельеф способствует более равномерному увлажнению поверхности почвы — на пониженных участках обычно высокая влажность. Экспозиция существенно влияет на увлажненность: на обращенных к солнцу склонах влажность грунта обычно меньше, чем на необращенных ввиду различного теплового баланса почвы. Температура воздуха и почвы играет определяющую роль в распределении влаги.

Таблица 49

Адгезия и поверхностное натяжение (по Макфорлону и Табору)

Жидкость	Угол контакта на стекле, *град*	Адгезия, *г*	Поверхностное натяжение
Спирт	0	1,43	22,3
Бензол	0	1,88	28,9
Вода	0	4,70	22,7
Анилин	17	2,64	42,9
Касторовое масло	0	2,10	33,0

Интересны выводы Ю. Б. Текучева (1975) о том, что капиллярное движение воды в глинах в связи с преобладанием в них ультрамикропор, заполненных связанной водой, незначительное.

Влияние литологического строения грунтов зоны аэрации сказывается через защемленный воздух, возникающий на границах капиллярных поверхностей раздела при движении фронта увлажнения вниз. Наличие защемленного воздуха снижает фильтрационную способность и капиллярную проводимость грунтов.

Х. Каванищи (1971) подчеркивает возможность влияния барометрического давления на коэффициент влагозапасов: «...при повышенном атмосферном давлении на водяной столб происходит снижение уровня воды за счет меньшего роста капиллярного давления...». Он отмечает также, что поскольку уровнем воды называют поверхность, на которой капиллярное давление ε равно атмосферному P, то приращение глубины уровня воды δh определяется выражением:

$$\delta h = \delta(p - \varepsilon) . \qquad (83)$$

Интересны результаты исследований Н. Е. Дзекунова и Б. А. Файбишенко (1975), которые выявили особенности взаимовлияния проникающей воды и водовмещающей среды. Установлены две фазы инфильтрации. Первая продолжительностью 0,5—2,0 суток характеризуется резким падением водопроницаемости. Коэффициент фильтрации уменьшается до одного, иногда до двух порядков их начальной величины. Во вторую фазу — 10—20 суток и больше; медленно растет водопроницаемость. Коэффициент фильтрации увеличивается (достигает первоначального значения) на один-два порядка. Двухфазность инфильтрации исследователи объясняют особенностью процесса движения воды сначала по крупным порам, втягиванием воды мелкими капиллярами из крупных пор и заполнением последних воздухом, высвобождающимся из мелких капилляров. Образуется пробка, вследствие чего движение фильтрующейся воды вниз замедляется. Далее проявляется вторая фаза инфильтрации, т. е. воздушная пробка в крупных порах начинает растворяться под давлением в грунтах и с увеличением поглощающей способности воды в результате снижения ее температуры.

В это время увеличивается всасывающая способность, растет приток инфильтрата. Согласно Аллисону, рост водопроводимости во второй фазе объясняется также и растворением солей.

Д. Т. Морган и Д. Т. Гордон (1970) считают, что диагенез, в особенности растворение, значительно изменяет коллекторские свойства, определяющие относительную проницаемость. По Н. Е. Дзекунову и Б. А. Файбишенко (1975), проводимость грунта связана не только с набуханием, так как наблюдаются две фазы инфильтрации воды при повторении опытов с короткими промежутками времени, когда испытуемый грунт остается влажным.

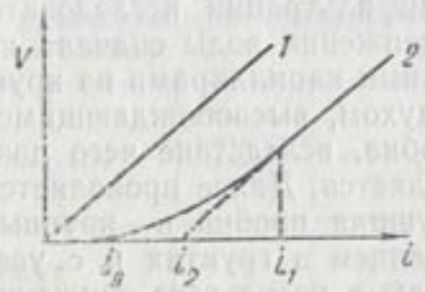
Р. Хиллс (1971) на основании исследований в Юго-Западной Англии (г. Бристоль) установил, что изменение влажности почв от зимы к лету на уплотненных участках было значительно меньше, чем на других. Он считает, «если имеется растительность, большая биологическая активность, то скорость инфильтрации, как и естественная влажность почв, испытывает колебания. Где лежит причинный эффект, заметить трудно». Установлено, что обработка или характер использования (пашня, фруктовый сад, заросший лес и т. д.) играют более важную роль при определении инфильтрационных свойств почв, чем их морфологические характеристики.

Д. Е. Смайл (1974) выявил, что в насыщенных глинистых сис-

темах процесс инфильтрации существенно отличается от такового в твердых почвах. Объясняется это постоянным увеличением в насыщенной глине гравитационной потенциальной энергии. Это явление имеет гораздо больше общего с капиллярным подъемом, чем инфильтрация в твердой почве.

Согласно данным, приведенным в книге «Развитие исследований по теории фильтрации в СССР», (за период 1917—1967 гг.), при величине поверхностного натяжения в 50 *дин/см* и среднем радиусе порового канала порядка $d=10^{-3}$ *см* капиллярные силы способны развить давление около $5 \cdot 10^4$ *дин/см*^{2}.

Ц. Жакен (1965), указывая на наличие отрицательного заряда, отмечает, что он компенсируется положительными ионами, расположенными между глинистыми частицами. При контакте глины с водой заряд и компенсирующие ионы способствуют возникновению явлений, связанных с двойными ионными слоями, которые образуются



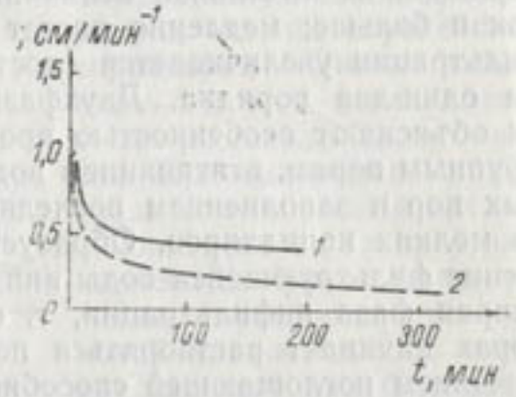


Рис. 27. Зависимость скорости движения воды от градиента (по Ц. Жакену): *1*—по закону Дарси; *2*—в действительности.

Рис. 28. Скорость инфильтрации из полукруглых борозд для двух почв (по Т. Талсму): *1*—мелкий песок; *2*—песок.

при определенном содержании влаги. Ц. Жакен пишет: «...если учитывать и другие параметры (пористость, концентрация солей в воде), то количество присутствующей воды окажется недостаточным для того, чтобы двойные ионные слои могли свободно развиваться...». Он отмечает, что изучение движения воды в плотных глинах вскрывает особое явление: в некоторых случаях пропорциональность между скоростью движения и гидравлическим градиентом не сохраняется (рис. 27). Для глин с высокой пористостью зависимость между градиентом и скоростью движения нелинейная даже при повышенных градиентах.

По данным Т. Талсма (1974), скорость инфильтрации зависит от характера деятельного покрова (в приборах с оголенной почвой — 0,29 *см/мин*, травой — 0,58, туссоком — 1,08), а также от механического состава грунтов (рис. 28): в мелкоземистом песке меньше, чем в обычном.

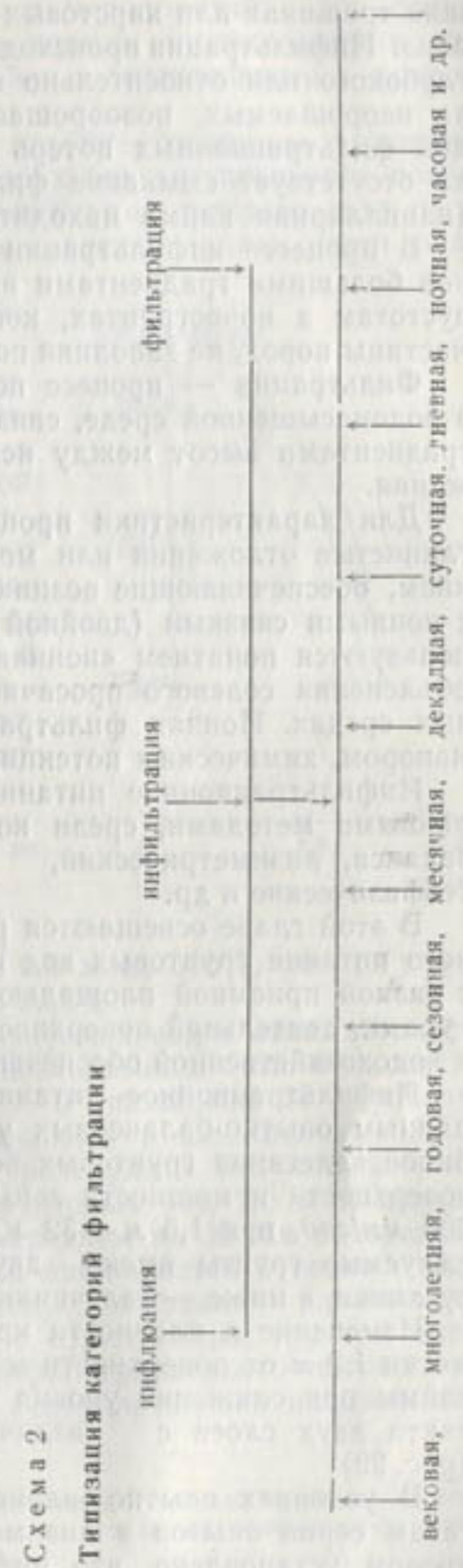
Мейнцер подразделил зону аэрации на три подзоны: почвенной влаги, промежуточной и капиллярной каймы. Согласно

Р. Стелману (1969), там, где уровень грунтовых вод находится на достаточно большой глубине и не определяет режим влажности в промежуточной подзоне, вертикальная фильтрация в большинстве случаев не изменяется во времени и может считаться стационарной. В зонах разгрузки динамика глубины залегания уровня грунтовых вод может значительно повлиять на скорость фильтрации, что происходит в результате изменения длины пути фильтрации и постоянном гидравлическом потенциале.

Процесс проникновения водных масс в грунт разделяется на инфлюацию, инфильтрацию и фильтрацию (схема 2). Инфлюация — погружение водных масс в крупные трещины выветривания горных пород или тектонические разломы и карстовые полости под действием силы тяжести.

Инфильтрация — проникновение водных масс в воздушносухие или влажные почвогрунты под действием сил гравитации и капиллярных, а также пленочных натяжений. Согласно М. Липперт (1976), интерцепция — выпадающие на поверхность земли осадки; собираются в почвенном покрове и аккумулируются здесь в большинстве случаев до полного его увлажнения. Фильтрация — движение водных масс под действием градиента напоров в водоносном горизонте в условиях полного насыщения.

Инфлюация характерна для горных массивов, имеет место в приводораздельных зонах, где в основном представлены крупные трещины ледникового происхождения, подверженные температурным воздействиям и тектоническим процессам. Источником инфлюации являются атмосферные осадки в твер-



дом, жидком виде и конденсирующаяся влага на стенках, в зияющих трещинах или карстовых полостях с последующим движением вниз. Инфильтрация происходит в условиях ненасыщенных грунтов, глубокого или относительно глубокого залегания подземных вод, на неорошаемых, новоорошаемых землях или в начальной стадии фильтрационных потерь из каналов орошаемых полей, когда отсутствует смыкание фильтрата с зеркалом грунтовых вод (капиллярная кайма находится ниже поверхности земли).

В процессе инфильтрации преобладает движение, обусловленное большими градиентами высот, по трещинам-порам, корневым пустотам в почвогрунтах, когда вода преимущественно обтекает частицы пород, не заполняя поры.

Фильтрация — процесс постинфильтрационный — происходит в водонасыщенной среде, связана преимущественно с небольшими градиентами высот между исходными и конечными точками движения.

Для характеристики процесса проникновения раствора через глинистые отложения или молодые сланцы с чешуйчатым строением, обеспечивающие возникновение диффузного слоя, или слоя с ионными связями (двойной электрический слой Гу— Чемпена), пользуются понятием «ионная фильтрация» (ульфильтрация) для объяснения солевого просачивания, распределения ионов в соленых средах. Ионная фильтрация обеспечивается гидравлическим напором, химическим потенциалом и температурными различиями.

Инфильтрационное питание грунтовых вод определяется различными методами, среди которых выделяются: общего водного баланса, лизиметрический, аналитический, ядерно-физические, геофизические и др.

В этой главе освещаются результаты изучения инфильтрационного питания грунтовых вод по годовым величинам в лизиметрах с разной приемной площадью, естественной и нарушенной структурами, деятельной поверхностью, климатической увлажненностью и водохозяйственной обеспеченностью.

Инфильтрационное питание грунтовых вод в лизиметрах, по данным опытно-балансовых участков, имеет тесную связь с глубиной залегания грунтовых вод. В условиях оголенной почвенной поверхности и мощности зоны аэрации 1,0 *м* оно составило 200 *мм/год*, при 1,5 *м* — 32 *мм/год*. Ранее было отмечено, что испытуемые грунты имеют двухслойное строение — до 1,2 *м* — суглинки, а ниже — галечники.

Изменение в плавности кривой спада инфильтрации ниже отметки 1,2 *м* от поверхности земли связано с отрывом капиллярной каймы при снижении уровня грунтовых вод ниже плоскости контакта двух слоев с различными капиллярными свойствами (рис. 29).

В условиях опытно-балансового участка «Малик» по результатам серии опытов в лизиметрах с суглинками, различным покровом установлено, что инфильтрационное питание грунтовых

вод обратно пропорционально мощности зоны аэрации и зависит от интенсивности водохозяйственных мероприятий. Для сравнительной характеристики показаны данные исследований в лизиметрах с хлопком, люцерной и без растительного покрова[1] (табл. 50).

Наибольшая фильтрация при глубине залегания грунтовых вод 1,0 *м* наблюдается в лизиметрах без растительного покрова (275 *мм/год*), а наименьшая — с люцерной второго года посева (187 *мм/год*). Видимо, это связано с расходованием части фильтрационной влаги на испарение растительным покровом до достижения уровня грунтовых вод.

Таким образом (табл. 51), инфильтрационное питание в лизиметрах с люцерной первого года посева больше по сравнению с люцерной второго. В лизиметрах с хлопчатником, по результатам многолетних наблюдений, величина инфильтрации при глубине залегания 0,5 м от поверхности земли составляет в среднем 288 *мм/год*; 1,0 — 210; 1,5— 152; 2,0 — 117; 3,0 *м* — 64 *мм/год*. Если принять питание грунтовых вод при мощности зоны аэрации 0,5 *м* за 100%, то при глубине 3,0 *м* инфильтрация снижается до 22,2%.

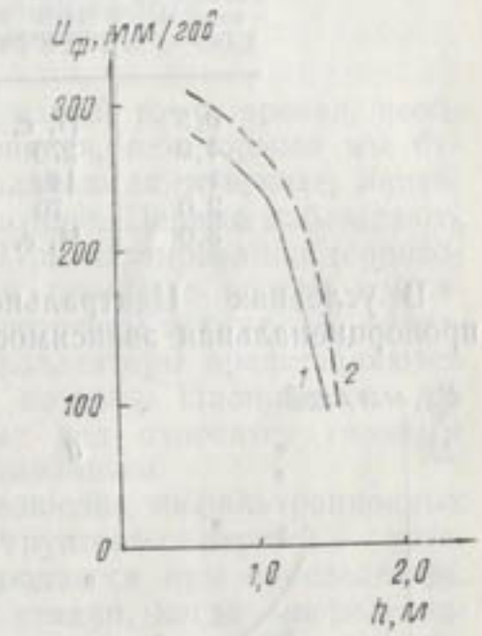


Рис. 29. Зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от глубины их залегания в различных грунтах:

1—монолит; 2—насыпной грунт.

Инфильтрационное питание грунтовых вод в лизиметрах с насыпными грунтами в первый год исследования было большим, чем с монолитом. Например, в 1961 г. в павильоне № 3 опытного участка «Малик» установлены приборы с хлопчатником при естественной и нарушенной структуре грунтов. Результаты показали, что на глубине залегания грунтовых вод 2,0 *м* в насыпных грунтах инфильтрация больше в среднем на 30 *мм* по сравнению с монолитом. Отмеченная разница наблюдается в первый год исследований, а в последующие годы показания сравниваются. В некоторых случаях лизиметры с естественным грунтом показывают даже бо́льшую величину инфильтрационного питания грунтовых вод, что видимо, связано с переуплотнением насыпных грунтов в период экспериментов.

[1] В лизиметрах с грунтом без растительного покрова приведены сведения об инфильтрации атмосферных осадков, в остальных оросительных водах — то же.

Выводы Л. Тюрка (1958), полученные по материалам исследования во Франции и Голландии, о несущественном влиянии структуры грунтов на показания лизиметров нам кажутся соответствующим действительности.

Таблица 50

Инфильтрационное питание грунтовых вод, *мм/год*

Глубина до воды, *м*	Без растительного покрова	Хлопчатник	Люцерна первого года посева	Люцерна второго года посева
0,5	Н. с.	288	Н. с.	Н. с.
1,0	276	210	259	187
1,5	149	152	170	120
2,0	70	117	125	75
3,0	Н. с.	64	92	30

В условиях Центральной Ферганы установлена обратно пропорциональная зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от мощности зоны аэрации. Так, при мощности зоны аэрации 1,0 *м* питание грунтовых вод в лизиметрах с супесями и суглинками естественной структуры в условиях произрастания хлопчатника составляет в среднем 80 *мм/год*; 1,5—45; 2,0—20; 2,5—7; 3,0 *м*—1,0 *мм/год*; с люцерной первого года посева при глубине залегания 1,0 *м* изменяется от 105 до 70 *мм/год* при мощности зоны аэрации 2,5 *м* (рис. 30).

По результатам многолетних (1957—1971 гг.) исследований в оазисах Бухары можно сделать следующие выводы: в условиях оголенной почвенной поверхности инфильтрация изменяется в среднем от 58 *мм/год* при глубине залегания грунтовых вод 0,5 *м* до 0 при 3,0 *м* (рис. 30).

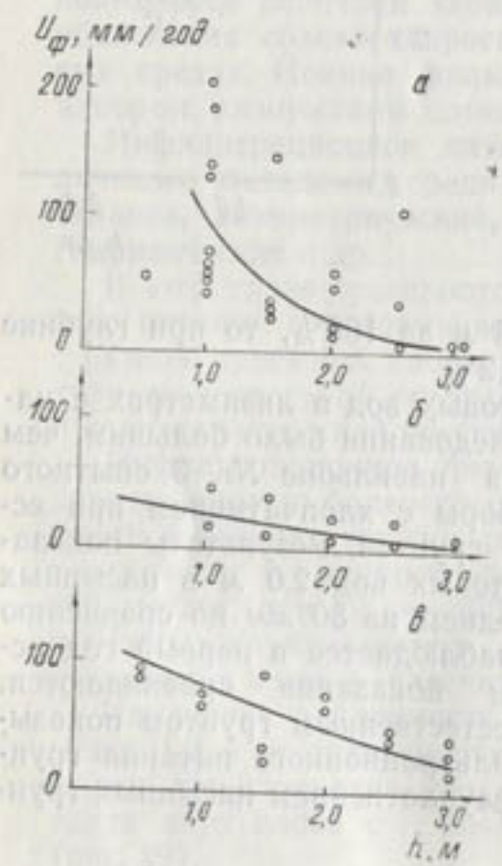


Рис. 30. Зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от глубины их залегания при различном деятельном покрове:

а — хлопчатник, *б* — оголенная почва, *в* — люцерна.

В лизиметрах с хлопчатником питание сильнее (рис. 30): на глубине 0,5 *м* — 95 *мм*; 1,0—80; 1,5—65; 2,0—45, 2,5—35; 3,0 *м* — 15 *мм*. Питание грунтовых вод в условиях произрастания хлопчатника в связи с орошением больше в среднем на 69%, чем в лизиметрах с оголенной почвой.

В условиях произрастания люцерны движение влаги отличается от предыдущего не намного, но при глубине 0,5 и 3,0 *м* питание в лизиметрах с люцерной первого года больше на 5 и 14 *мм/год*, а при 1,0—2,5 *м* совпадает (рис. 30).

ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

До изложения существа вопроса, с нашей точки зрения, необходимо конкретизировать основные понятия, с которыми мы будем сталкиваться в дальнейшем. Различаются точечные, линейные и площадные инфильтрационные потери. Первые наблюдаются в местах утечек из трубопроводов. При картировании территорий в мелком масштабе площадные и линейные потери принимаются точечными. Вторые обычно приурочены к каналам, оросителям, в некоторых случаях дрены и коллекторы представляются объектами линейных фильтрационных потерь. Площадные инфильтрационные потери поверхностных вод относятся главным образом к орошаемым полям и водохранилищам.

Можно выделить три случая соотношения инфильтрационных потерь поверхностных вод с питанием грунтовых: первый — потери больше питания, что обычно наблюдается при определенной мощности зоны аэрации, в начальной стадии, когда инфильтрационная кайма с грунтовыми водами не смыкается. В этом случае часть воды насыщает грунт зоны аэрации. Следовательно, на уровень грунтовых вод приходит воды меньше, чем погрузилось в почву. Второй случай — равенство потерь и питания, наблюдается при смыкании инфильтрационного потока с грунтовыми водами, поток воды проходит транзитом. Третий — превышение питания грунтовых вод над потерями поверхностных может фиксироваться при достаточной мощности зоны аэрации (больше капиллярной каймы). Это возможно при наличии в грунтах зоны аэрации «остаточного слоя влаги в виде свободной воды» или при наличии конденсации, предшествующей или происходящей одновременно с потерями поверхностных вод. Необходимо отметить, что источниками «остаточного слоя влаги» могут служить внутригрунтовое испарение, поверхностные водотоки, атмосферные осадки.

Влияние инфильтрационных вод на уровенный режим грунтовых может быть прямым и косвенным. Первое наблюдается при горизонте грунтовых вод не ниже высоты капиллярного поднятия. В тех случаях, когда мощность зоны аэрации превышает высоту капиллярного поднятия и нет сброса воды, инфильтрационные потери могут косвенно влиять на формирование запасов

грунтовых вод. В этом случае наблюдается запаздывание, длительность которого зависит от глубины залегания грунтовых вод, проницаемости грунтов зоны аэрации и в некоторой степени от структуры, засоленности и температуры почв, минерализации и химического состава проникающих вод. При косвенном влиянии эффект инфильтрационных вод может выразиться в течение одной стадии, через несколько стадий, суток, месяцев, лет в зависимости от гидрогеологических условий.

Величина инфильтрационного питания может быть рассчитана как произведение изменения уровня грунтовых вод ΔH_x, обусловленного просачиванием атмосферных осадков, на недостаток насыщения слоя почвогрунтов μ.

$$W_п = 10\mu\Delta H_x, \tag{84}$$

где $W_п$ — выражено в миллиметрах слоя;
ΔH_x — в сантиметрах;
μ — в долях от объема почвогрунта.

Величину питания, кроме того, можно определять по уравнению водного баланса зоны аэрации

$$W_п = M + X - Y_{пов} - E_п - \Delta U_{пон} + \Delta U_a, \tag{85}$$

где M — недостаток насыщения;
X — количество осадков, выпавших за расчетный период;
$Y_{пов}$ — поверхностный сток;
$E_п$ — испарение с почвы;
$\Delta U_{пон}$ — потери на аккумуляцию в понижениях;
ΔU_a — потери на доведение влажности всей зоны аэрации до значения наименьшей влагоемкости.

Очень перспективна методика определения питания грунтовых вод за счет инфильтрации из каналов и на полях путем моделирования — решением обратных задач. Для этого необходимы наблюдения за уровнем грунтовых вод и знания параметров пластов. Эффективно определение питания грунтовых вод в орошаемых районах методом природных радиоактивных изотопов. Для этой цели наиболее пригоден тритий, обладающий небольшим периодом полураспада. Его можно определять на основе анализа графиков колебаний уровня грунтовых вод. Для бессточных районов М. М. Крылов (1959) предлагает пользоваться простой зависимостью:

$$X = \Delta h_{ос}(\beta_m - \beta_n), \tag{86}$$

где X — инфильтрация осадков до уровня грунтовых вод;
$\Delta h_{ос}$ — подъем уровня, вызванный инфильтрацией осадков;
$(\beta_m - \beta_n)$ — недостаток насыщения грунта.

В. Г. Ткачук (1949) рекомендует определять питание грунтовых вод с учетом подземного оттока за счет осадков по следующей формуле:

$$Q = \frac{H}{K_{эф}} + TY, \tag{87}$$

где Q — количество воды, поступающей за период T в горизонт грунтовых вод, *мм*;
H — высота повышения уровня грунтовых вод за период T, *мм*;
$K_{эф}$ — коэффициент эффективности осадков;
T — период наблюдения, сутки;
Y — средний отток грунтовых вод (*мм/сут*), который принимается по данным наблюдений за период отсутствия питания, испарения и транспирации (или с учетом последних).

Можно использовать методику определения инфильтрации атмосферных осадков с учетом подземного оттока, предложенную для зандровых и аллювиальных равнин Н. Н. Биндеманом (1960). В этом случае отток вычисляется по графикам колебания уровня грунтовых вод. Расчет величины инфильтрации для осеннего и весеннего периодов производится по формуле:

$$W = \mu\frac{\Delta h + \Delta z}{365}, \tag{88}$$

где W — величина инфильтрации, *м/сутки*;
μ — недостаток насыщения породы водой в долях единицы объема;
Δh — наблюдаемое повышение уровня грунтовых вод за весенний период, *м*;
Δz — величина, на которую уровень грунтовых вод снизился за счет оттока по водоносному пласту, *м*.

В. И. Лялько и Г. А. Шнейдерман для орошаемых засушливых районов на основе теплового обмена разработали метод определения инфильтрационного питания грунтовых вод за счет осадков. Авторы предлагают способ расчета влагопереноса через зону аэрации над капиллярной каймой грунтовых вод. Для его применения, кроме наблюдений за влажностью и температурой (продолжительностью не менее одного года), необходимы следующие исходные данные: 1) массовые экспериментальные определения форм влаги для грунтов зоны аэрации; 2) лабораторные определения коэффициента фильтрации и пористости для грунтов надкапиллярной зоны; 3) экспериментальные определения коэффициента потенциалопроводности и термовлагопроводности и их зависимости от влагосодержания температуры и плотности для типовых грунтов зоны аэрации.

Рассматриваемый метод может применяться и для орошаемых участков. Расчеты инфильтрационного питания грунтовых вод возможны на основе аналитического решения дифференциальных уравнений неустановившегося движения. Эти методы освещены в работах С. Ф. Аверьянова, Н. Н. Веригина, П. Я. Полубариновой-Кочиной и др. Инфильтрационное питание грунтовых вод можно определить также при помощи моделирования на моделях ЭГДА. В этом случае предполагается, что независимо от глубины залегания уровня грунтовых вод инфильтрационный расход по глубине при просачивании не изменяется. Интенсивность инфильтрационного питания по глубине может быть описана зависимостью Аверьянова — Крылова (Сорокина, 1971)

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^n, \qquad (89)$$

где параметр $n = 1 - 2 - 3$ — коэффициент, который для данного участка должен определяться специально;

ω — интенсивность инфильтрации по глубине:

ω_0 — интенсивность инфильтрации на поверхности земли (количество поданной воды, выпавших атмосферных осадков и т. д.);

z — глубина залегания уровня грунтовых вод;

z_0 — критическая глубина инфильтрации.

Методы изучения инфильтрационных потерь разделяются на лабораторные и полевые, а те в свою очередь на экспериментальные и расчетные. К лабораторным экспериментальным относим определение инфильтрации в испарителях, лизиметрах, грунтовых лотках. К лабораторным расчетным — ЭГДА, ЭВМ, расчет по режимным графикам при известных параметрах водоносного горизонта, определение микробаланса влаги, анализ влаго-теплопереноса, конечных разностей, эмпирических зависимостей.

К полевым экспериментам относится определение инфильтрации в полевых условиях испарителями, лизиметрами, стоковыми площадками. К полевым расчетным — методы водного баланса, гидродинамической сетки движения грунтовых вод, тензиометрический, радиоизотопный и геофизический (гирлянды, влагохлоромер, донный инфильтрометр). Последний комплекс методов мы назвали полевыми расчетными потому, что они, основываясь на полевых исследованиях, связаны с использованием номограмм, переходных коэффициентов, эмпирических зависимостей и т. д.

Коротко остановимся на достоинствах и недостатках методов определения инфильтрационного питания грунтовых вод.

Метод весовых испарителей. Широко применяются почвенные испарители ГГИ-500-100, ГГИ-500-50, ГГИ-3000, БГИ, площадь

которых изменяется от 500 *см*² до 5 *м*², высота монолита грунта — от 0,5 до 2,0 *м*.

Почвенные испарители рекомендованы для определения инфильтрации под естественным увлажненным. За исключением большого гидравлического испарителя, установки не приспособлены к условиям орошаемого земледелия из-за ограниченности высоты монолита, бортика испарителя, небольшой емкости сосуда инфильтрации, а также отсутствия возможности моделирования желаемой мощности зоны аэрации. Что касается применения БГИ, то он разработан в стадии опытного образца и серийно не выпускается.

Лизиметрический метод. Основной экспериментальный точечный способ определения инфильтрационного питания грунтовых вод. Установки с площадью поперечного сечения 0,1—5,2 *м*², высотой 1,0—3,0 *м* применялись в производственных условиях. В настоящее время в САНИИРИ исследуются лизиметры площадью 25 *м*². Согласно данным Л. Тюрка, за рубежом имеются приборы площадью 625 *м*², заполняемые грунтом нарушенной структуры. Подробно о лизиметрическом методе исследования инфильтрации сказано далее.

Метод грунтовых лотков. Применяется главным образом для определения точечного инфильтрационного питания грунтовых вод в лабораторных условиях. Из-за дороговизны и ограниченного срока службы, а также громоздкости в полевых условиях используется редко.

Метод стоковых площадок. Широко распространен в условиях достаточного естественного увлажнения для определения площадного инфильтрационного питания грунтовых вод на расчлененных участках, образованных хорошо проницаемыми отложениями. Дает хорошие результаты. В условиях орошения не применяется.

Метод водного баланса. Используется в условиях орошаемого земледелия, связан с дорогостоящим бурением для отбора проб грунта на влажность, гидрометрическими и другими побочными наблюдениями. Точность определения неудовлетворительная, используется для определения площадного инфильтрационного питания грунтовых вод.

Методы ЭГДА и ЭВМ — лабораторные, применяются для определения площадного инфильтрационного питания; точность зависит от исходных параметров и оптимальности граничных условий. От всех остальных отличаются дороговизной и громоздкостью стендовых и машинных установок. Оценка надежности полученных результатов связана с решением обратной задачи.

Методы определения инфильтрационного питания грунтовых вод по режимным данным (графикам). Методы микробаланса и конечных разностей находятся в зависимости от точности определения водоотдачи, величины колебания уровня грунтовых вод. Согласно П. Г. Гребенюкову, В. Н. Иванову, ошибки составляют 20—30%.

Метод эмпирических зависимостей. Дает точечную характеристику инфильтрационного питания грунтовых вод, наименее точен из всех указанных. Ошибки определений, по П. Г. Гребенюкову, В. Н. Иванову, составляют 30—50%.

Методы определения инфильтрационного питания грунтовых вод по гидродинамической сетке движения грунтовых вод. Применимы главным образом для определения линейных фильтрационных потерь. Результаты зависят от точности параметров режима и грунтов зоны аэрации.

Тензометрический, радиоизотопный, геофизические методы. Связаны в некоторой степени с качественной оценкой инфильтрации поверхностных вод и составлением баланса влаги погоризонтно. Относятся к разряду точечных методов. Ввиду обязательности использования переходных коэффициентов от индексных показаний приборов к абсолютным величинам ошибки определений колеблются в широких пределах. Это связано с недостаточной разработанностью принципиальных схем, конструкций приборов и методики производства полевых определений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

В предыдущей главе на основании материалов о годичных величинах инфильтрационного питания грунтовых вод показана зависимость инфильтрации от мощности зоны аэрации. Среднемноголетние данные независимо от деятельного покрова, механического состава, структуры грунтов указывают на снижение интенсивности инфильтрации с увеличением глубины залегания грунтовых вод. Указанная зависимость также наблюдается по сезонам года и по среднемноголетним месячным суммам.

ЗАВИСИМОСТЬ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ОТ РЕЖИМА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Анализ материалов исследований Кургантюбинской воднобалансовой станции, по данным лизиметров площадью 0,44 $м^2$, мощностью зоны аэрации 1,0 *м*, оголенной почвенной поверхностью, монолитным грунтом указывает на хорошую сходимость режима питания грунтовых вод с ходом выпадения атмосферных осадков за невегетационный период. На рис. 31 показан совмещенный график многолетнего режима увлажнения почвы и инфильтрационного питания грунтовых вод за невегетационный период. За 1965—1970 гг. наблюдается достаточная синхронность, максимальная инфильтрация на уровень грунтовых вод в основном соответствует максимуму атмосферных осадков. Необходимо все же отметить, что величина инфильтрации в грунт и на зеркало подземных вод зависит от интенсивности выпадения атмосферных осадков. При кратковременном, особенно ливневом, характе-

ре дождей, инфильтрация осадков меньше по сравнению с нормальным режимом атмосферного увлажнения почвы.

На величину инфильтрации определенное влияние оказывает структура грунта. По данным исследований опытно-балансового участка «Малик», в насыпных грунтах инфильтрационное питание грунтовых вод в пределах точности определений больше, чем в монолитах. На рис. 32 показан совмещенный график питания грунтовых вод за счет атмосферных осадков в лизиметрах с площадью 0,1 $м^2$, глубиной залегания грунтовых вод 1,5 *м* за не-

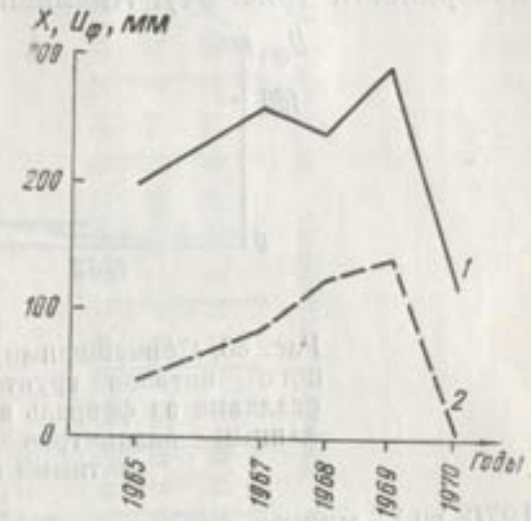


Рис. 31. Совмещенный график многолетнего режима увлажнения почвы атмосферными осадками и инфильтрационного питания грунтовых вод за невегетационный период:

1 — осадки; *2* — инфильтрационное питание.

вегетационный период 1962—1965 гг., а на рис. 33—за февраль того же периода. Независимо от характера деятельного покрова наблюдается повышенная инфильтрация в лизиметрах с насыпными грунтами (табл. 51). Соотношение величин по прибору с моноли-

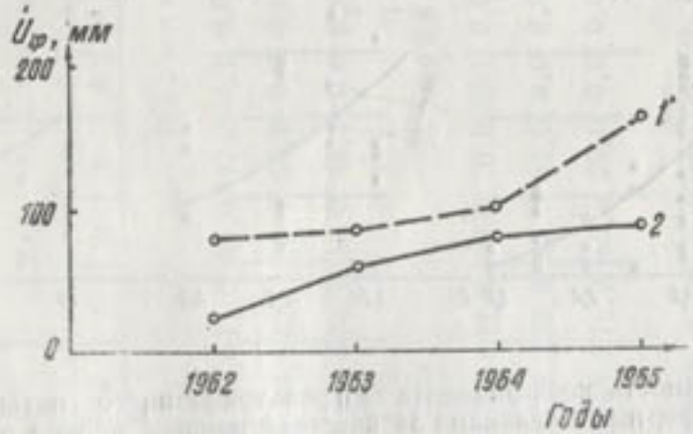


Рис. 32. Совмещенный график инфильтрационного питания грунтовых вод атмосферными осадками в невегетационный период за 1962—1965 гг. по данным лизиметров с насыпными (*1*) и монолитными (*2*) грунтами.

том и насыпным грунтом составляет: 0,30 в 1962 г., 0,67—1963; 0,75—1964; 0,53—1965 г.; по сумме за невегетационный период, за февраль — 1,68; 0,73; 0,37; 0,71 соответственно.

Для характеристики зависимости воспользуемся коэффициентом инфильтрации $K = U_{ф/x}$, выражающим отношение величины питания грунтовых вод к атмосферным осадкам (для анализа

использованы данные за невегетационный период). Коэффициент инфильтрационного питания грунтовых вод атмосферными осадками уменьшается с увеличением мощности зоны аэрации, что прослеживается независимо от климатической увлажненности, структуры грунтов, приемной площади лизиметров и деятельной поверхности (рис. 34). Анализируя данные за многолетие (1962—

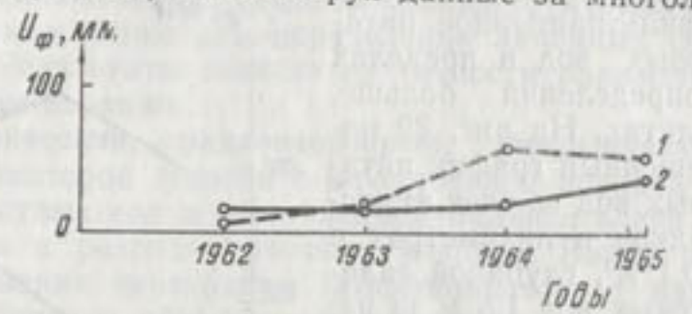


Рис. 33. Совмещенный график инфильтрационного питания грунтовых вод атмосферными осадками за февраль в период 1962—1965 гг. по данным лизиметров с насыпными (*1*) и монолитными (*2*) грунтами.

1970 гг.), можно сделать вывод о зависимости инфильтрационного питания от размеров приемной площади.

При обобщении материалов о питании грунтовых вод атмосферными осадками в различных оазисах Узбекистана, насыпных,

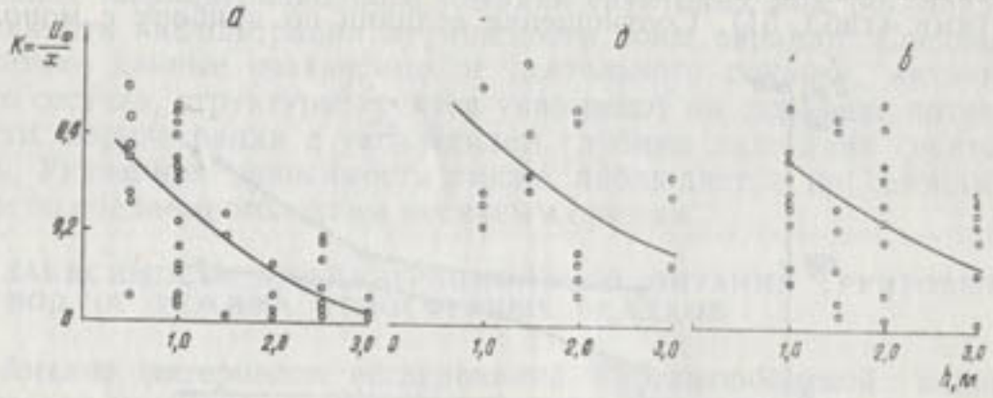


Рис. 34. Зависимость коэффициента инфильтрационного питания грунтовых вод атмосферными осадками за невегетационный период от мощности зоны аэрации:

а — 0,44 *м*² (Вахшская долина); *б* — 1,44 *м*² (Каршинская степь); *в* — 1,44 *м*² (Голодная степь).

монолитных грунтах и др. обратили внимание на повышенное питание грунтовых вод в лизиметрах на глубине 1,5 *м* (табл. 52). Увеличение при мощности зоны аэрации 1,0 *м* колеблется от 18,6 до 5,0% и наблюдается во всех регионах.

Аналогичное явление установлено на Щемиловской опытно-балансовой станции ВСЕГИНГЕО. Его причина, по-видимому, заключается в своеобразном движении фильтрационного потока свер-

Таблица 51

Величины атмосферных осадков (*мм*), месячного инфильтрационного питания грунтовых вод (*мм*, %) в лизиметрах площадью 0,1 *м*² с насыпным и монолитным грунтом за невегетационный период (1962—1964 гг.) при мощности зоны аэрации 1,5 *м*

Год	Январь			Февраль			Март			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за невегетационный период			Деятельный покров
	А	И	%	А	И	%	А	И	%	А	И	%	А	И	%	А	И	%	А	И	%	
Насыпной грунт																						
1962	36,5	2,4	6,6	31,1	9,6	30,0	17,3	25,6	142,2	30,1	0,0	0,0	47,1	26,4	56,0	40,9	16,0	39,1	203,0	80,0	39,4	Люцерна
1963	8,4	13,2	157,1	50,3	22,0	43,9	52,3	26,2	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,6	24,0	45,6	163,6	85,4	51,1	Люцерна
1964	19,0	7,0	37,0	36,7	57,5	156,0	76,9	37,0	48,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	132,6	101,5	76,6	Хлопчатник
Монолитный грунт																						
1962	36,5	4,8	13,0	31,1	16,0	51,5	17,3	0,0	0,0	30,1	0,0	0,0	47,1	0,0	0,0	40,9	3,4	8,3	203,0	24,2	11,9	Люцерна
1963	8,4	15,2	19,0	50,3	16,0	3,2	52,3	16,0	31,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,6	10,0	19,0	163,6	57,2	35,1	Люцерна
1964	19,0	10,5	55,2	36,7	21,5	58,5	76,9	45,5	59,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	132,6	77,5	58,4	Хлопчатник

Примечание. А — сумма атмосферных осадков, *мм*; И — сумма инфильтрационного питания грунтовых вод *мм*; % — доля инфильтрации атмосферных осадков.

ху вниз — «эффекте остаточной влаги в зоне аэрации». При движении влаги в ненасыщенном грунте поток, частично расходуясь на испарение, постепенно опускается вниз. При меньших мощностях зоны аэрации сливается с зеркалом грунтовой воды и на этом уровне продолжает испаряться. А в относительно глубоком лизиметре пришедшая влага сверху или верховодка продолжает двигаться вниз. Так как она опустилась ниже, то возможности расходования на испарение, естественно, меньше, т. е. испарение с горизонта верховодки или слоя с «остаточной влажностью» происходит менее интенсивно. Таким образом, определенный слой гравитационной воды при минимальных возможностях испарения сохранится; при следующем атмосферном увлажнении сливается с инфильтрационным и идет на питание грунтовых вод. Иначе говоря, в невегетационный (весенний, зимний) период происходит

Таблица 52

Среднемноголетние данные о питании грунтовых вод атмосферными осадками за невегетационный период (% от атмосфорных осадков)

Глубина залегания грунтовых вод, *м*	„Каманга-рон"	„Малик"					
	монолит $s=1{,}44$ *м*²	монолит, $s=0{,}1$ *м*²	монолит $s=0{,}36$ *м*²	насыпной грунт $s=1{,}0$ *м*²	монолит $s=1{,}44$ *м*²	монолит $s=0{,}1$ *м*²	монолит $s=2{,}0$ *м*²
	хлопковое поле	хлопковое поле				люцерновое поле	
1.0	60,7	23.0	50,0	29,2	34.1	31,6	47,5
1,5	65,7	32,1	8,9	34,9	39,7	42,7	66,1
2,0	50,4	29,8	5,5		33,5	27,2	0,4

наложение фильтрационных вод сверху на линзу гравитационной воды, находящейся над зеркалом грунтовых вод.

Вторая причина указанного явления, видимо, кроется в возможностях образования конденсационной влаги. Так, при меньшей мощности зоны аэрации, чем 1,5 *м*, ввиду ограниченного слоя надкапиллярной зоны возможности образования конденсационных вод ограничены или их нет. А при глубоком (более 1,5 *м*) мощность надкапиллярной зоны больше и условия градиента температур и влажности грунтов способствуют конденсации влаги из воздуха с последующей передачей на зеркало грунтовых вод. К сожалению, ввиду отсутствия синхронных наблюдений за динамикой влажности грунтов зоны аэрации, испарением и инфильтрационным питанием, а также низкой точности температурных наблюдений в почвогрунтах на затронутый вопрос однозначно ответить трудно.

ЗАВИСИМОСТЬ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ОТ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ ЗОНЫ АЭРАЦИИ

Задача решается на основе материалов Кургантюбинской гидрогеологической партии. Здесь проводились наблюдения за инфильтрационным питанием, испарением грунтовых вод и динамикой запасов влаги в грунтах. Отметим, что влага определялась один раз в декаду, тогда как расход и питание грунтовых вод измерялись два раза в сутки.

Коротко остановимся на характеристике природных условий лизиметрической площадки. Грунты зоны аэрации имеют слоис-

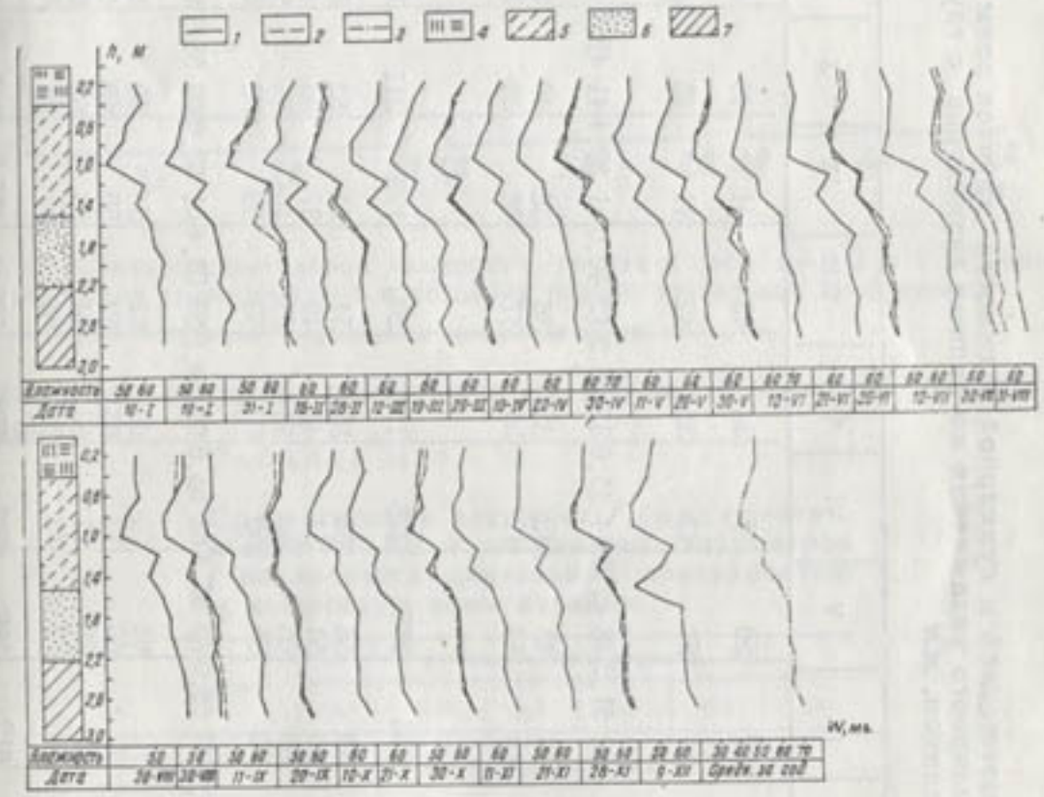


Рис. 35. Эпюры влажности грунтов зоны аэрации по данным лизиметра с мощностью зоны аэрации 3,0 *м*, посевом хлопчатника за 1968 г.:

1—срочные; *2*—среднемесячные; *3*—среднегодовые; *4*—почвенный слой; *5*—супесь; *6*—песок; *7*—суглинок.

тое строение: 0,0—0,4 *м* — почвенный слой; 0,40—1,50 *м* — супесь, 1,50—2,20 *м* — песок; 2,20—3,00 *м* — суглинок. Мощность капиллярной каймы в среднем составляет 2,05 *м* и колеблется от 1,9 до 2,2 *м*.

Характеризуя динамику влажности почвы по среднемесячным значениям, можно отметить, что над зеркалом грунтовых вод, на уровне разрыва менисков в капиллярах, она уменьшается. Выше и ниже его (рис. 35) повышается. Увеличение влажности по направлению к зеркалу подземных вод легко объясняется повыше-

Таблица 53

Сведения о послойной, средневзвешенной и суммарной влажности грунтов зоны активного влагообмена, капиллярного разрыва и капиллярного увлажнения по данным лизиметров с глубиной залегания грунтовых вод 3,0 *м*, с хлопчатником, *мм*

Глубина от поверхности земли, *м*	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ср. год	Зона
0,2	53	51	58	57	50	45	34	43	41	46	44	47	48	Активного влагообмена
0,4	55	49	55	54	51	47	38	42	41	46	42	45	48	
Среднее 0,6	51	47	51	52	48	44	35	42	40,0	42,2	42	43	43,6	
0,8	46	46	46	48	43	42	35	36	41	40	39	37	45	
1,0	41	41	42	45	43	42	34	37	38	38	39	38	41,4	
Сумма	246	234	252	256	235	228	176	200	197	211	206	218	222	Капиллярного разрыва
1,20	61	59	58	59	58	56	52	51	41	52	54	58	53	Капиллярного увлажнения
1,40	58	52	51	56	54	54	48	49	37	48	49	51	52	
1,60	54	61	68	68	65	63	58	57	46	56	58	58	60	
1,80	67	69	69	70	65	69	62	59	50	62	62	62	65	
Среднее 2,00	69	65,5	68	70	69	66,4	59,1	58,4	51	58,1	61	61	65	62,6
2,20	68	67	67	72	68	70	62	54	54	60	63	62	65	
2,40	72	68	72	72	69	73	65	61	55	62	63	63	67	
2,60	70	70	68	71	69	71	63	64	53	62	64	64	66	
2,80	71	73	72	74	73	73	66	64	57	68	67	68	70	
Сумма	590	588	593	612	598	591	538	526	483	541	541	541	563	

нием доли капиллярной воды в грунтах. Источниками этого по направлению к поверхности земли являются атмосферные осадки, поливные воды, может быть, конденсация. Запас влаги в слое активного обмена, т. е. в толще грунта, расположенной выше ка-

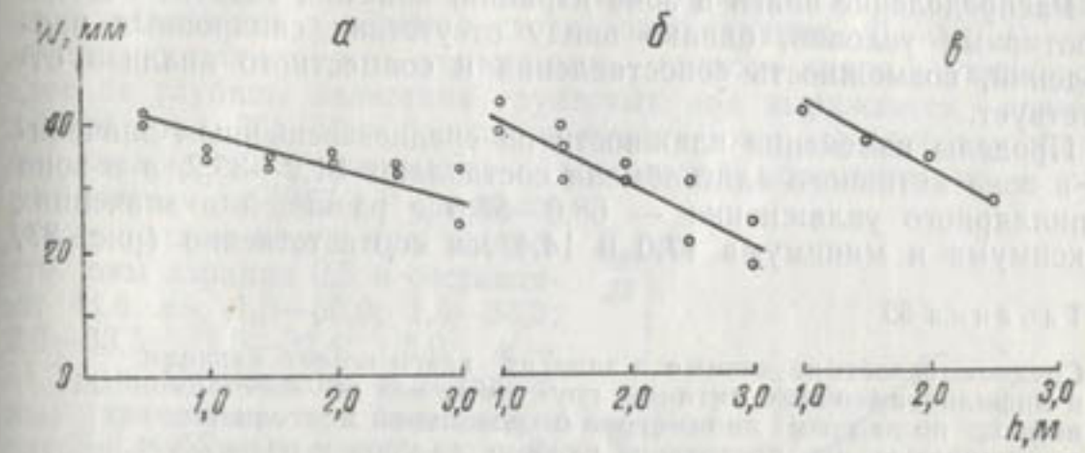


Рис. 36. Связь среднегодовой влажности грунта в слое 0—0,2 *м* с глубиной залегания грунтовых вод в условиях разной деятельной поверхности:

а — пар; *б* — хлопчатник; *в* — люцерна первого года посева.

пиллярного разрыва, изменяется от 176 *мм* в июле до 256 *мм* в апреле.

Таблица 54

Среднегодовая влажность (*мм*) грунта в слое 0,0—0,2 *м* по данным лизиметров с различными деятельной поверхностью и мощностью зоны аэрации

Год	Мощность зоны аэрации, *м*					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Пар						
1965	40,2	35,5	33,3	33,1	31,0	23,0
1966	41,6	35,0	34,3	33,5	32,4	31,3
Хлопчатник						
1965			38,8		30,3	
1966		43,0	35,8			
1974		38,3	31,2	30,2	21,0	17,4
Люцерна первого года посева						
1965		40,9	36,3	34,2	26,2	

Если взять средневзвешенную величину влажности для зоны активного обмена (0,0—1,0 *м*), то она меняется от 35,2 *мм* в июле до 51,2 *мм* в апреле, при среднегодовой величине 44,4 *мм*. В зоне капиллярного разрыва варьирует от 34 до 46 *мм*.

В зоне капиллярной влажности (1,0—3,0 *м*) суммарные запасы в сентябре и апреле соответственно колеблются от 483 *мм* до 612 *мм*, среднемесячные — от 53,6 до 68,0 *мм*. Среднегодовые составляют 563 *мм*, а среднемесячные — 62,6 *мм* (табл. 53).

Распределение влаги в зоне аэрации, конечно, зависит от температурных условий, однако ввиду отсутствия синхронных наблюдений, возможность сопоставления и совместного анализа отсутствует.

Пределы изменения влажности по средневзвешенным значениям в зоне активного влагообмена составляют 51,2—35,2, а в зоне капиллярного увлажнения — 68,0—53,6 с разницей в значениях максимума и минимума 17,0 и 14,4 *мм* соответственно (рис. 37,

Таблица 55

Среднемноголетние данные о запасах влаги в зоне аэрации и инфильтрационном питании грунтовых вод за вегетационный период по данным лизиметров с различной деятельной поверхностью, при постоянной глубине до уровня воды 2,5 *м* от поверхности земли. *мм*

Хлопчатник		Люцерна		Пар	
влажность грунтов зоны аэрации	инфильтрационное питание грунтовых вод	влажность грунтов зоны аэрации	инфильтрационное питание грунтовых вод	влажность грунтов зоны аэрации	инфильтрационное питание грунтовых вод
530	0,0	410	0	380	1,5
540	1,0	420	0,3	390	1,5
550	2,5	440	1,8	400	1,5
560	4,5	460	3,0	410	1,5
570	7,0	480	4,8	420	1,5
580	10,0	500	6,8	430	2,0
590	16,0	520	8,6	440	2,0
600	22,0	540	10,0	450	2,0
		560	12,0	460	2,5
		580	13,6	470	3,0
		600	15,2	480	3,0
		620	16,8	490	4,0
		640	18,6		

табл. 54). Следовательно, трудно утверждать о постоянстве запасов влаги (при неизменности зеркала грунтовых вод) в зоне капиллярного увлажнения. Если динамика запасов влаги в зоне активного влагообмена главным образом объясняется влиянием условий в приземном слое атмосферы (тепловой баланс, дефицит влажности и температуры воздуха и т. д.), а также корневой системы растений, то достаточно активная динамичность в зоне капиллярного увлажнения, видимо, связана с иссушением почвы (межполивные периоды), некоторым опусканием нижней границы зоны разрыва капилляров в периоды интенсивного расходования влаги на испарение.

Анализ данных исследований на Кургантюбинской воднобалансовой станции указывает на влияние растительного покрова на распределение влажности в грунтах. Для характеристики взяты показания лизиметров с паровой поверхностью, хлопчатником, люцерной первого года посева. Если проследить за распределением влажности в верхней части зоны аэрации (0—0,2 *м*), то можно установить, что зависимость запасов влаги в указанном слое от глубины залегания грунтовых вод выражается прямой линией (рис. 36). Чем больше мощность зоны аэрации, тем меньше влажность. В лизиметре с деятельной поверхностью — пар (по данным за 1965 г.) среднегодовые запасы влаги при мощности зоны аэрации 0,5 *м* составляют 41,6 *мм*; 1,0—35,0; 1,5—34,3; 2,0—33,5; 2,5—32,4; 3,0 *м* — 31,3 *мм*. Отклонения в абсолютных значениях при изменении глубины грунтовых вод от 1,0 до составляют 3,7 *мм*.

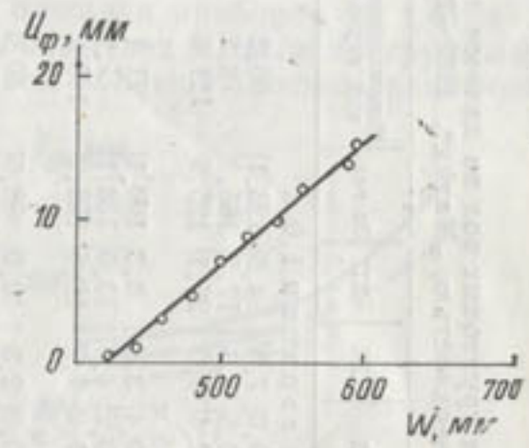


Рис. 37. Связь инфильтрационного питания грунтовых вод за невегетационный период с запасами влаги в грунтах.

В условиях произрастания хлопчатника и люцерны в распределении влажности происходят определенные изменения, связанные с появлением фактора орошения и влиянием корневой системы на интенсивность расхода влаги через транспирацию. Запас влаги выше 40 *мм* в условиях пара в слое 0—0,2 *м* наблюдается на сравнительно небольших глубинах залегания грунтовых вод — 0,5 *м*, а в условиях произрастания хлопчатника и люцерны в связи с орошением и дополнительным увлажнением грунтов — на глубине 1,0 *м*. Под влиянием орошения в запасах влаги наблюдаются значительные отклонения: 20,9 *мм* в лизиметрах с хлопчатником, 14,7 *мм* — с люцерной (3,7 *мм* фиксируется в приборах с паровой поверхностью) (табл. 54).

Суммарный запас влаги грунтов зоны аэрации прямо пропорционален мощности рассматриваемой толщи. Инфильтрационное питание увеличивается с повышением влажности (рис. 37). По данным Кургантюбинской воднобалансовой станции, при мощности зоны аэрации 2,5 *м* в условиях произрастания люцерны за вегетационный период с запасами влаги от 420 до 640 *мм* инфильтрационное питание грунтовых вод увеличилось от 0,3 до 18,6 *мм*. Аналогичные зависимости получены по данным лизиметров с хлопчатником и паровой поверхностью (табл. 55).

Установить четкую зависимость инфильтрации от запасов влаги при различной деятельной поверхности не удалось. Можно лишь отметить, что питание грунтовых вод в условиях орошения

Таблица 56

Среднемноголетние суммы инфильтрационного питания грунтовых вод по данным лизиметров с различными площадью, мощностью зоны аэрации и деятельной поверхностью, „Малик", 1962—1971 гг.

Площадь лизиметра, $м^2$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год	Невегетационный период	Вегетационный период	Деятельный покров в лизиметре
	Мощность зоны аэрации 1,0 м															
0,1	6,2	30,9	17,3	15,4	5,0	17,8	7,1	11,4	0,2	0,0	7,0	4,8	123,1	66,2	55,9	Хлопчатник
1,0	6,9	28,4	21,9	28,2	14,0	25,4	8,0	11,1	0,3	0,5	3,3	17,2	165,2	78,2	87,0	
1,44	15,6	31,4	34,1	31,9	6,3	24,4	9,1	8,4	0,8	0,4	8,0	25,1	195,5	114,6	80,9	
	1,5 м															
0,1	11,6	26,9	20,1	14,4	6,0	5,8	3,8	7,6	0,4	0,4	3,8	8,3	109,1	71,1	38,0	—
1,0	10,8	24,4	18,6	13,5	5,5	26,6	11,2	4,6	4,8	0,2	4,9	13,0	138,1	71,9	66,2	—
1,44	13,6	34,5	29,5	28,4	5,8	31,8	12,7	10,2	1,3	1,2	7,7	18,5	195,2	105,2	90,2	—
	2,0 м															
0,1	15,2	11,5	11,0	23,0	5,8	0,0	15,5	12,3	0,0	0,0	2,3	0,0	96,6	40,0	55,6	—
1,0	5,7	28,8	22,0	16,0	7,8	44,0	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	4,6	128,1	59,1	69,0	—
	1,0 м															
0,1	5,0	21,1	21,2	4,4	4,2	12,6	10,4	16,5	1,9	0,0	9,3	18,4	125,0	75,0	50,0	Люцерна
	1,5 м															
0,1	3,4	10,6	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	8,1	39,4	39,4	0,0	—
	2,0 м															
0,1	2,0	15,4	2,4	1,5	0,0	0,0	2,8	0,0	0,8	0,0	0,0	4,5	29,4	24,3	5,1	—
	1,0 м															
1,0	4,3	17,2	23,1	52,4	29,1	13,4	0,0	0,0	0,0	0,0	7,2	18,1	164,8	69,9	94,9	Перелог
	1,5															
1,0	3,7	10,0	13,2	15,1	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	3,9	51,2	34,5	16,7	—
1,44	3,2	7,8	20,1	36,4	32,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	3,4	15,2	118,6	49,9	69,7	—
	1,0 м															
1,0	0,5	70,9	9,4	0,7	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	80,8	19,2	Пар
	1,5 м															
1,0	0,9	47,2	46,1	1,5	12,0	—	—	—	—	—	—	—	107,7	144,5	17,2	—

больше и величина его по сезонам года различна. Это связано с особенностями развития растений и распределения корневой системы, а также запасами в почве влаги.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛИЗИМЕТРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Инфильтрационное питание грунтовых вод зависит от площади лизиметров. В приборах с малой приемной поверхностью (0,1 $м^2$) часть запасов влаги из зоны аэрации расходуется на повышенное испарение за счет большего нагрева грунта под влиянием бортика лизиметров. С увеличением площади приборов до 1,44 $м^2$ и более доля участия инфильтрационных вод в питании грунтовых растет. Чем больше площадь, тем больше инфильтрационное питание грунтовых вод (рис. 38).

В некоторых случаях в лизиметрах с площадью 2,0 и 3,24 $м^2$ величина инфильтрационного питания грунтовых вод несколько снижается, что, видимо, связано с относительно большим развитием корней растений и некоторым увеличением транспирации влаги.

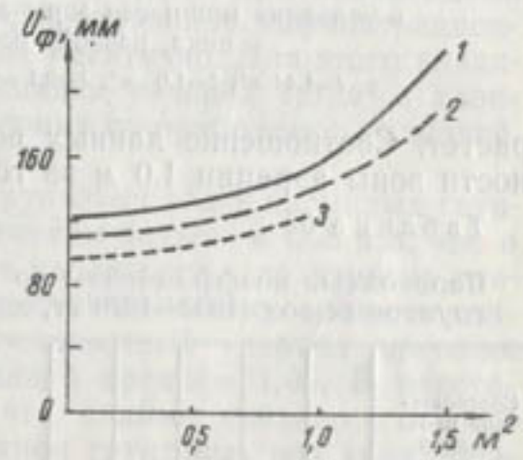


Рис. 38. Зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от площади лизиметров при разной мощности зоны аэрации:

1—1,0 *м*; *2*—1,5 *м*; *3*—2,0 *м*.

Если рассматривать годовые величины питания, не разделяя их на невегетационный и вегетационный периоды, можно констатировать уменьшение инфильтрации с глубиной, т. е. при увеличении мощности зоны аэрации она снижается, фиксируется при разных площадях лизиметров и деятельном покрове (табл. 56).

Необходимо отметить, что эффект «остаточной влаги в зоне аэрации», который мы установили, рассматривая закономерности инфильтрационного питания грунтовых вод (атмосферными осадками) за невегетационный период, по годичным данным не наблюдается, так как летом «остаточная влага» не формируется, а успевает израсходоваться на испарение (рис. 39).

Таким образом, грунтовые воды получают максимальное питание в зимний и весенний периоды года, когда температура грунтов относительно низкая, возможности испарения ограничены. В вегетационный период даже во время интенсивных поливов на уровень грунтовых вод приходится небольшое количество инфильтровавшейся в зону аэрации влаги, которая расходуется главным образом на испарение и транспирацию при соответствующем дренажном стоке (табл. 57).

Инфильтрация с единицы площади лизиметра на уровень грунтовых вод с увеличением размеров приемной поверхности

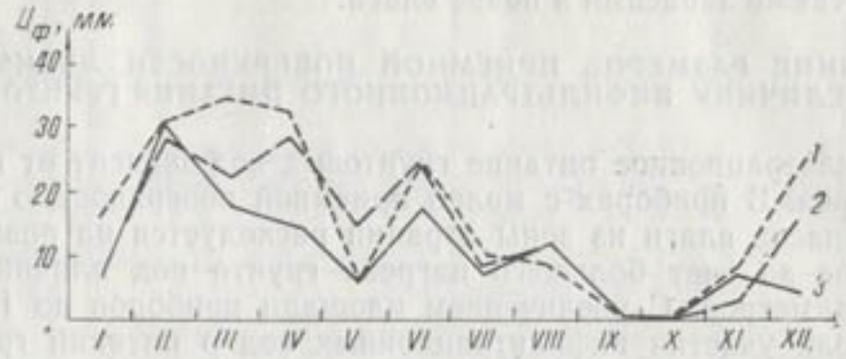


Рис. 39. Режим инфильтрационного питания грунтовых вод в условиях мощности зоны аэрации 1,0 *м*, посева хлопчатника, разной площади лизиметров:

1—1,44 *м*²; *2*—1,0 *м*²; *3*—0,1 *м*².

растет. Соотношение данных по приборам 0,1 и 1,0 *м*² при мощности зоны аэрации 1,0 *м* за год составляет 0,74, в невегетацион-

Таблица 57

Переходные коэффициенты по инфильтрационному питанию грунтовых вод (1962—1976 гг, деятельный покров—хлопчатник)

Соотношение площадей лизиметров	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год	Невегетационный период	Вегетационный период
h=1,0															
0,1/1,0	0,89	1.08	0,79	0,54	0,36	0,70	0,88	1,02	0,66	—	2,10	0.28	0,74	0,84	0,65
0,1/1,44	0,40	0,90	0.51	0,48	0,79	0,73	0,78	1,35	2,66	—	0,88	0,19	0.63	0.58	0,70
h=1,5															
0,1/1,0	1.07	1.10	1,08	1.06	1,09	0,28	0,33	1,65	0,08	2.00	0,78	0,64	0,79	0,99	0,57
0,1/1.44	0,85	0,78	0,68	0,50	1,03	0,18	0,30	0,74	0,31	0,30	0,49	0,45	0,56	0,68	0,42
h=2.0															
0,1/1,0	2,66	0,43	0,50	1,43	0,74	—	—	—	—	—	—	—	0,75	0.68	0,82

ный период — 0,84, вегетационный — 0,65, а по лизиметрам с площадью 0,1 *м*² и 1,44 *м*² — соответственно 0,63, 0,58, 0,70. Переходные коэффициенты при изменении глубины залегания грунтовых вод колеблются от 0,42 до 0,99. Если рассматривать месячные данные, то диапазон изменения их значительный — от 0,08 до 2,66. Экстремальные значения, видимо, связаны с особенностями развития, состояния растений в лизиметрах. Переходные коэффициенты по среднемесячным значениям при мощности зоны аэрации 1,0 *м* составляют 0,76; при 1,5 *м* — 0,74; при 2,0 *м* — 0,48 (табл. 57).

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ГРУНТОВ НА ВЕЛИЧИНУ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Ввиду многофакторности изучаемого параметра необходимо выбирать те условия, при которых формирование инфильтрационного питания в различных установках идентично. Для этого анализировались данные лизиметров площадью сечения 1,0 *м*² с хлопчатником, а также многолетний материал по приборам с люцерной, естественной растительностью (табл. 58).

На глубине 1,0 и 1,5 *м* питание грунтовых вод в насыпных грунтах с хлопчатником по годовым величинам больше в 1,08 раз, чем в приборах с монолитом. Превышение наблюдается по данным приборов с люцерной и естественной растительностью, соответственно составляя 1,21 и 1,05. За невегетационный период значения переходных коэффициентов составили в среднем 1,05. В некоторых случаях они меньше единицы, что, видимо, связано с относительно большим суммарным испарением грунтовых вод ввиду различия в росте зеленой массы.

В целом можно заключить, что на величину инфильтрационного питания грунтовых вод в лизиметрах структура грунта оказывает определенное влияние независимо от мощности зоны аэрации, приемной площади прибора, деятельной поверхности.

Анализируя грунт с момента установки лизиметра, можно выяснить, что под влиянием неоднократного увлажнения, деятельности корневой системы уплотняются и оструктуриваются почвы. Если увлажнение в основном способствует уплотнению грунтов, то развитие корневищ в зоне аэрации вызывает увеличение влагоемкости и пористости почв. Таким образом, действуют два фактора оструктуривания почвы как бы с противоположным знаком. Под влиянием хозяйственной деятельности человека этот процесс усиливается. В естественных условиях структурообразование в почве охватывает длительное время, в некоторых случаях целые геологические эпохи. Поэтому, говоря о восстановлении структуры насыпных грунтов в лизиметрах, подразумеваем частичное восстановление или ирригационное уплотнение. Добиться полного соответствия структуры нарушенного грунта монолитному (естественному) невозможно, так как в нем непрерывно происходит структурообразование и переход естественных грунтов от легкого

Таблица 58

Среднемноголетние (1962—1970 гг.) величины инфильтрационного пи грунтами при различных мощностях зоны аэрации, деятельном пок тания грунтовых вод в лизиметрах с монолитным и насыпным рове и площади прибора, *мм*

Площадь, $м^2$	Монолит													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	за год	невегетационн. период
Хлопчатник, мощность зоны аэрации 1,0 *м*														
0,1	0,0	24,6	34,8	0,5	9,5	5,9	9,0	15,7	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	59,4
1,0	14,8	26,2	13,8	0,7	12,4	0,0	30,6	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	105,2	54,8
1,44	5,9	32,9	25,2	19,4	10,0	7,3	11,6	2,0	0,9	0,7	5,0	2,2	123,1	71,9
Хлопчатник, 1,5 *м*														
0,1														
1,0	6,1	24,5	15,3	1,3	10,3	22,8	6,3	6,7	4,1	0,8	0,0	21,9	119,6	68,6
1,44	10,6	19,0	17,7	20,6	3,3	33,2	8,9	4,1	4,9	0,4	4,5	12,3	139,5	64,5
Люцерна, 1,0 *м*														
0,1	2,2	23,2	24,7	7,5	7,6	18,0	18,9	17,3	4,2	0,0	12,4	5,8	141,8	68,3
Люцерна, 1,5 *м*														
0,1	5,2	20,8	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	10,4	22,0	71,5	67,2
Перелог, 1,0 *м*														
0,1	2,3	26,6	12,0	26,5	22,8	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	8,6	128,0	52,7
Перелог, 1,5 *м*														
1,0														
1,44	2,1	14,3	18,9	23,9	24,0	11,6	17,0	0,0	0,0	0,1	2,6	10,2	124,7	48,2

Площадь, $м^2$	Насыпной грунт													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	за год	невегетационный период
Хлопчатник, мощность зоны аэрации 1,0 *м*														
0,1	6,1	21,4	6,3	2,3	4,7	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	15,3	13,9	78,7	63,0
1,0	7,8	22,1	9,1	17,5	12,6	10,4	8,8	5,9	0,1	0,1	2,9	16,1	113,4	58,1
1,44														
Хлопчатник, 1,5 *м*														
0,1														
1,0	4,8	26,5	17,5	7,6	5,3	3,0	4,0	18,3	0,0	0,0	8,4	14,2	122,4	71,4
1,44	6,5	27,7	12,0	14,1	7,6	21,2	16,2	5,2	0,0	0,0	9,3	8,9	128,7	64,4
Люцерна, 1,0 *м*														
0,1	8,6	19,0	17,8	1,8	0,8	7,2	1,9	15,9	0,8	0,0	22,5	14,8	111,1	82,7
Люцерна, 1,5 *м*														
0,1	2,8	8,0	12,8	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	13,2	12,4	50,6	49,2
Перелог, 1,0 *м*														
0,1	0,9	27,0	10,0	7,0	13,4	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	9,1	78,3	55,7
Перелог, 1,5 *м*														
1,0														
1,44	3,1	28,9	34,0	11,0	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	2,6	87,8	71,0

механического состава к более тяжелому под влиянием разрушения частиц и увеличения количества мелких фракций.

Изучая влияние структуры грунта на инфильтрацию, мы обратили внимание на то, что показания лизиметров с насыпным грунтом в первый год несколько больше, чем с монолитом, но со временем становятся близкими. При сравнении среднемноголетних данных выясняется небольшое различие между ними, которое находится в пределах ошибок измерений, объясняемых метрологической точностью и различием условий экспериментов из-за несоответствия природных и водохозяйственных условий (табл. 59). Период соответствия показаний лизиметров по годовой величине инфильтрационного питания грунтовых вод в связи с ирригационным уплотнением насыпного грунта составляет 2—4 года.

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ВЕЛИЧИНУ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Инфильтрационное питание грунтовых вод изучалось за невегетационный период, когда отсутствует орошение, динамика запаса влаги обеспечивается в основном атмосферным увлажнением и по сумме за год в результате полива и интенсивного испарения. Упоминая в таблицах и рисунках за невегетационный период (зима и осень) хлопчатник и люцерну, мы имеем в виду сохранение стеблей хлопчатника (частичное или полное) и возможное влияние их на распределение атмосферных осадков из-за расходования части их на смачивание поверхностей древесной расти-

Таблица 60

Среднемноголетние величины инфильтрационного питания грунтовых вод по орошаемым районам в условиях различного деятельного покрова и мощности зоны аэрации, *мм*

Мощность зоны аэрации, *м*	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	за год	Деятельный покров
Голодная степь														
1,0	8,0	33,5	25,0	22,4	8,2	22,5	11,1	10,8	0,2	0,2	5,9	10,7	158,5	Хлопчатник
1,5	12,0	28,4	22,4	18,2	5,7	19,3	8,6	7,5	1,7	0,4	5,2	12,7	142,1	
2,0	10,4	9,2	6,5	9,5	6,8	12,0	8,2	6,8	2,1	0,6	0,8	12,4	85,3	
1,0	5,0	21,0	21,2	4,4	4,2	13,0	10,1	16,4	1,9	0,0	9,2	13,2	119,6	Люцерна
1,5	3,6	14,6	9,1	0,3	0,0	0,0	1,1	0,0	0,1	0,0	9,4	6,5	44,7	
1,0	2,4	14,1	16,2	26,7	22,3	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	9,6	101,6	Перелог
1,5	2,2	18,0	11,3	13,6	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,6	4,5	55,7	
Вахшская долина														
1,0	0,0	22,1	24,4	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	69,9	Оголенная почва
2,0	0,0	7,4	6,3	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,3	
0,5	6,6	25,2	33,9	8,8	8,3	5,6	14,9	5,6	0,0	0,0	0,0	3,0	112,5	Пар
1,0	8,4	22,4	25,5	1,7	15,4	6,0	19,8	3,5	0,0	0,0	0,0	2,4	105,1	
1,5	11,2	4,4	15,7	6,7	9,4	8,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	65,3	
2,0	2,1	6,3	6,8	6,6	2,8	4,9	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,5	
2,5	1,0	0,6	2,1	5,3	2,8	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,5	
3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	1,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	
1,0	24,3	15,6	39,7	8,8	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	97,4	Люцерна
1,5	0,0	6,5	28,7	9,4	7,0	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	5,0	0,0	60,4	

тельности. Следовательно, уменьшается количество осадков, доходящих до поверхности почвы на хлопковом поле в период до уборки стеблей и наблюдается различие в растительном покрове. В настоящее время трудно оценить долю атмосферных осадков, расходуемых на смачивание, из-за отсутствия специальных исследований.

Таблица 59

Длительность периода восстановления соответствий в показаниях лизиметров с нарушенными и монолитными грунтами в условиях различной глубины залегания подземных вод и деятельного покрова

Глубина до воды, *м*	Номер лизиметра	Первый год наблюдения	Год соответствия показаний лизиметра	Длительность периода, год
Хлопчатник				
1,0	62 64	1962	1965	3
1,5	61 63	1662	1966	4
2,0	60	1962	1964	2
Люцерна				
1,0	31 27	1962	—	—
1,0	30 26	1962	—	—
1,5	29 25	1962	1964	2
1,5	28 24	1962	1964	2
Перелог				
1,8	9 11	1962	1964	2
1,5	8 10	1962	—	—

Инфильтрационное питание в условиях орошения зависит от транспирационной способности растительного покрова и глубины проникновения корневой системы, нормы и режима полива.

На опытно-балансовых участках «Малик» и «Кургантюбе» собран наиболее комплексный экспериментальный и фактический материал. Исследовались лизиметры с оголенной почвой, естественной растительностью (перелог), паром, люцерной и хлопчатником. Деятельный покров существенно влияет на инфильтрационное

питание грунтовых вод, наименьшая величина которого в лизиметрах с оголенной почвой и мощностью зоны аэрации 1,0 *м* — 69,9 *мм/год*, перелогом — 101,6; люцерной — 119,6; хлопчатником — 158,5. Наибольшая инфильтрация происходит в условиях произрастания хлопчатника (табл. 60, рис. 40), несколько меньшая — люцерны. Это, видимо, связано со значительной транспирационной способностью многолетнего растения и сравнительно большой корневой системой.

Для любого растительного покрова инфильтрационное питание грунтовых вод в невегетационный период выше, чем за вегетацию. По данным лизиметра с деятельной поверхностью — пар, летом отмечается несколько повышенное питание, что, видимо, связано с конденсацией влаги в зоне аэрации. Относительно меньшие величины в Вахшской долине можно объяснить меньшими размерами (0,44 $м^2$) лизиметров (в Голодной степи — 1,44 $м^2$).

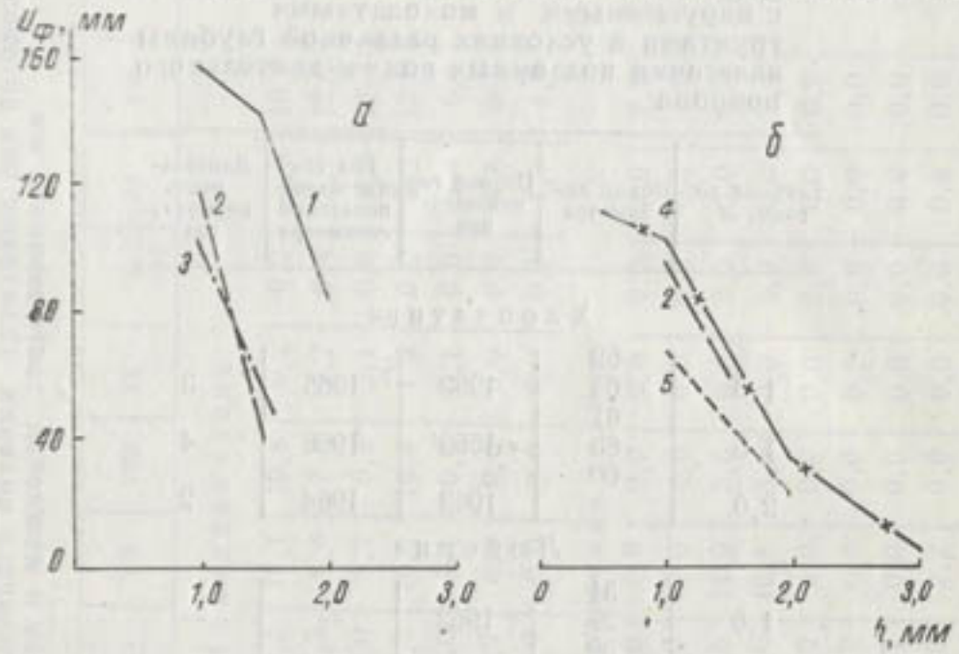


Рис. 40. Совмещенные графики зависимости годовой суммы инфильтрационного питания грунтовых вод от глубины их залегания в условиях различного деятельного покрова:

а — Голодная степь; *б* — Вахшская долина: *1* — хлопчатник; *2* — люцерна; *3* — перелог; *4* — пар; *5* — оголенная почва.

Для показа зависимости инфильтрации от деятельного покрова с особенностями климатической увлажненности сопоставлены результаты многолетних исследований по Каршинской степи, Бухарскому оазису и Ферганской долине (табл. 61). Рассматривались данные за невегетационный период, когда основным источником увлажнения являются атмосферные осадки. И в этом случае зависимость от деятельного покрова четкая. Наибольшее увлажнение отмечается в Каршинской степи (сумма осадков за невегетационный период 156,1—372,1 *мм*), наименьшее — в Ферганской долине (37,7—144,0 *мм*).

Сумма инфильтрационного питания грунтовых вод в Каршинской степи составила 94,9 *мм*, а в Ферганской долине — 34,2 *мм* в условиях посева хлопчатника и при мощности зоны аэрации 1,0 *м*. Данные по Бухарскому оазису находятся в промежуточном положении. Необходимо отметить, что анализ материалов по инфильтрации выполнялся за период 1968—1970 гг. Сюда входит 1969 г., характеризующийся выдающейся многоводностью. Он, естественно, мог повлиять на среднемноголетнюю величину. Этот факт необходимо учитывать.

Таблица 61

Среднемноголетние величины инфильтрационного питания грунтовых вод за невегетационный период по орошаемым районам в условиях различного деятельного покрова и мощности зоны аэрации, *мм*

Мощность зоны аэрации, *м*	Невегетационный период						Сумма инфильтрации, *мм*	Сумма атмосферных осадков, *мм*	Деятельный покров
	I	II	III	X	XI	XII			
Каршинская степь									
1,0	7,0	48,4	33,8	0,0	5,3	0,4	94,9	156,1—372,1	Хлопчатник
1,5	2,2	37,7	34,7	0,0	0,0	0,0	74,6		
2,0	0,0	6,9	50,3	0,0	0,0	0,0	57,2		
3,0	0,0	6,2	17,9	0,0	0,0	0,0	24,1		
1,0	7,4	33,8	27,8	0,0	4,3	1,5	74,8	156,1—372,1	Перелог
1,5	9,0	23,0	22,4	0,0	0,0	1,7	56,1		
2,0	3,4	13,7	17,2	5,6	0,0	1,4	41,3		
3,0	0,0	4,9	5,9	0,0	0,0	0,0	10,8		
Бухарский оазис									
1,0	7,8	3,0	37,2	0,0	0,9	2,8	57,7	71,6—154,8	Перелог
1,5	1,1	4,0	25,7	0,0	0,0	0,0	30,8		
2,0	0,0	0,0	24,7	0,0	0,0	0,0	24,7		
3,0	0,0	0,0	13,8	0,0	0,0	0,0	13,8		
Ферганская долина									
0,5	15,6	17,2	34,4	12,1	2,3	12,2	94,7	37,7—117,0	Хлопчатник
0,7	10,8	22,0	4,9	3,3	18,0	2,4	61,4		
1,0	5,6	13,3	15,3	0,0	0,0	0,0	34,2		

Принимая во внимание влияние атмосферного увлажнения, мы попытались установить зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от суммы атмосферных осадков за невегетационный период. На рис. 41 показана зависимость в условиях мощности зоны аэрации 0,5—1,0 *м* с использованием данных по трем оазисам с различными почвенно-климатическими и гидрогеологическими условиями, о чем свидетельствует большой разброс точек.

По результатам многолетних исследований на опытно-балансовом участке «Бешкент» в Каршинской степи переходный коэффициент от лизиметров с люцерной к инфильтрационному питанию

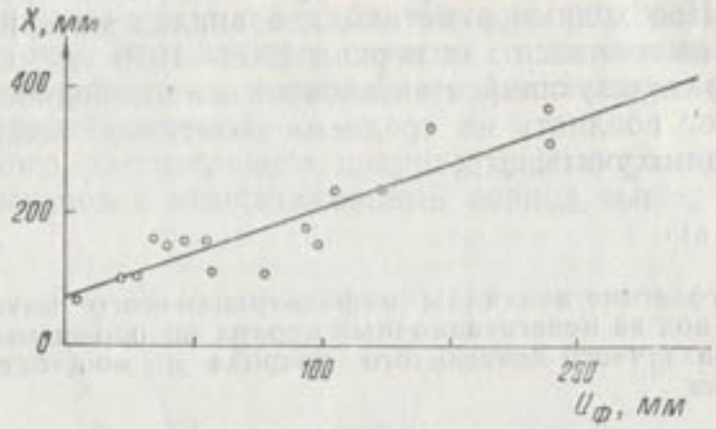


Рис. 41. Зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от величины атмосферных осадков за невегетационный период при мощности зоны аэрации 0,5—1,0 *м*.

грунтовых вод в условиях произрастания хлопчатника равен 0,75 при мощности зоны аэрации 1,0 *м* и 0,3 при 1,5 *м* (табл. 62). Низкую величину при глубине 1,5 *м* можно объяснить относитель-

Таблица 62

Переходные коэффициенты по инфильтрационному питанию грунтовых вод в условиях роста люцерны к показателям лизиметра с хлопчатником

Мощность зоны аэрации, *м*	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1,0	0,62	0,62	0,84	0,20	0,51	0,51	0,90	1,52			1,55	1,24	0,75
1,5	0,30	0,51	0,40	0,20			0,12		0,06		1,80	0,51	0,31

но высокой долей участия грунтовых вод в испарении с почвенной поверхности в условиях роста люцерны, особенно посевов второго и третьего года. Переходные коэффициенты по месячным значениям изменяются от 0,06 до 1,80, в большинстве случаев — меньше единицы. Ввиду неидентичности условий опытов, а также погрешностей в измерениях поправочные коэффициенты по другим вариантам вычислить не удалось.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИВОВ НА ИНФИЛЬТРАЦИОННОЕ ПИТАНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Специальные исследования не проводились, но имеются материалы, характеризующие инфильтрацию в лизиметрах с различ-

ными оросительными нормами. Наиболее качественный материал собран в Бухарском оазисе (опытно-балансовый участок «Камангарон») и Каршинской степи («Бешкент»). Из отчетных материалов удалось выбрать месячные суммы поливной воды по лизиметрам с хлопчатником и люцерной, на основании которых построен график зависимости инфильтрационного питания грунтовых вод

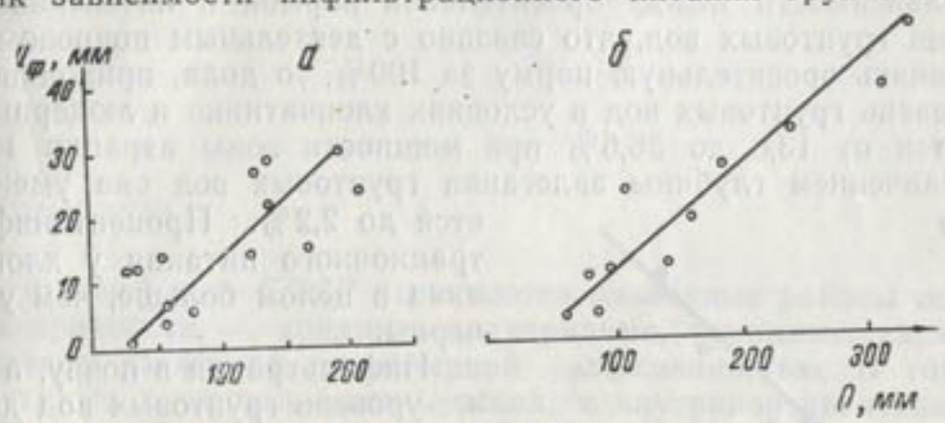


Рис. 42. Зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от месячной суммы оросительной воды:

а — хлопчатник; *б* — люцерна.

(рис. 42). В целом инфильтрация увеличивается с повышением нормы поливной воды. Питание грунтовых вод в условиях произ-

Таблица 63

Инфильтрационное питание грунтовых вод (% от оросительной воды) за вегетационный период, в зависимости от деятельного покрова и мощности зоны аэрации

Глубина до уровня грунтовых вод, *м*	Бухарский оазис		Голодная степь		Вахшская долина		Каршинская степь	
	хлопчатник	люцерна	хлопчатник	люцерна	хлопчатник	люцерна	хлопчатник	люцерна
1,0	16,5	17,5	21,3	19,7	36,6	15,2	26,7	13,8
1,5	7,7	8,7	18,1	19,8			22,5	10,9
2,0	3,8	8,5	16,6		12,6	13,1	18,7	9,0
2,5						9,4	13,1	
3,0	2,2	6,6	13,6	14,5	11,9	4,2		7,3

растания хлопчатника больше, чем в приборах с люцерной. Такое соотношение величин, как правило, наблюдается при близком залегании грунтовых вод. С увеличением мощности зоны аэрации имеются отклонения в ту и другую стороны (табл. 63). Приведенные на рис. 42 зависимости относятся к мощности 1,0—3,0 *м* и охватывают период наблюдений 1967—1972 гг. Более детально проработать дифференциацию зависимости при разных глубинах

залегания грунтовых вод не удалось из-за недостаточности фактического материала.

Для сравнительной характеристики приведены результаты исследования (рис. 43) в Каршинской степи (мощность зоны аэрации — 1—2 *м*). В двух орошаемых районах получены аналогичные зависимости между оросительной нормой и интенсивностью питания грунтовых вод, что связано с деятельным покровом. Если принять оросительную норму за 100%, то доля, приходящаяся на уровень грунтовых вод в условиях хлопчатника и люцерны, изменяется от 13,8 до 36,6% при мощности зоны аэрации 1,0 *м*. С увеличением глубины залегания грунтовых вод она уменьшается до 2,2%. Процент инфильтрационного питания у хлопчатника в целом больше, чем у люцерны.

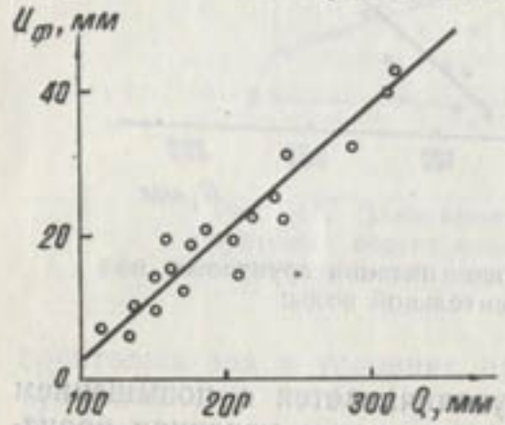


Рис. 43. Зависимость инфильтрационного питания грунтовых вод от месячной суммы оросительной воды.

Инфильтрация в почву, а также уровень грунтовых вод должны формироваться под влиянием начальных запасов влаги. Обычно между указанными величинами существует прямая зависимость. Обработка материалов за вегетационный период 1967—1972 гг., по данным Кургантюбинской воднобалансовой станции, не подтвердила указанное, видимо, требуются данные за более короткие периоды и синхронность наблюдений.

Важно при изучении взаимосвязи инфильтрационного питания грунтовых вод и деятельного покрова знать особенности развития люцерны как многолетней культуры в условиях ограниченной мощности зоны аэрации. Обработка материалов наблюдений по Бешкентскому опытно-балансовому участку показывает, что в условиях произрастания люцерны первого года посева инфильтрация на зеркало подземных вод составила 31,4% при 1,0 *м*; 28,2—1,5 *м*; 21,2—2,0 *м*; 10,6%—3,0 *м*. У трехлетней люцерны доля инфильтрации уменьшается и соответственно составляет 10,5; 9,6; 4,0; 2,6%, что меньше на 20,9; 18,6; 17,0; 8,0%, чем у люцерны первого года посева.

Влияние поливных вод на величину инфильтрационного питания грунтовых зависит от вида растительности и особенностей развития зеленой массы, корневой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В хлопковой зоне СССР выделяются различные районы по условиям аридности — аридные, полуаридные, гумидные, характеризующиеся различной атмосферной увлажненностью. В горной части сухость воздуха — наименьшая, к внутриконтинентальным песчаным массивам и краевым пустыням увеличивается.

Регион, объединяющий Азербайджан, Южный Казахстан и Среднюю Азию, по климатической увлажненности разделяется на зоны ничтожного, скудного, недостаточного, умеренного, достаточного увлажнения. Сочетание условий аридности и климатической увлажненности на фоне ирригационно-хозяйственного фактора формирует направленность гидрогеологического процесса, определяет мелиоративное состояние земель.

Орошаемые территории характеризуются многолетним установившимся и неустановившимся уровенным и гидрохимическим режимом грунтовых вод. В первых районах мелиоративный процесс относительно устойчив, небольшие отклонения от нормы регулируются. Территории второго типа должны постоянно контролироваться на основе экспериментального изучения элементов водного и солевого баланса для научного предвидения и осуществления оптимальных водохозяйственных мероприятий.

В связи с водохозяйственным освоением новых земельных массивов, переустройством ирригационной сети на старых землях, а также осушением происходят изменения в питании и расходовании грунтовых вод. Водно-солевой режим зоны аэрации обусловливает появление новых составляющих, удельный вес которых в ряде случаев оказывается большим. Структура баланса зависит не только от естественных факторов, но во многом определяется интенсивностью мелиоративных мероприятий.

Практика воднобалансовых расчетов и возможности их использования показали нецелесообразность составления локальных разработок. Оправдан тезис «от бо́льшего к меньшему». Балансовые расчеты должны выполняться при обоснованных граничных условиях, оптимальных расчетных схемах, регулярно, в научно-обоснованные сроки, соответствовать мелиоративному контролю, в противном случае теряется оперативное значение.

Проектирование и строительство объектов воднобалансовых станций должны производиться на основе учета природных и водохозяйственных условий, оценки состояния и перспектив водохозяйственного строительства. В каждом крупном регионе должны функционировать базовые и временные ключевые участки, что увеличит оперативную ценность и повысит качество первичной информации. Ключевые участки должны размещаться с учетом районирования по степени аридности, климатической увлажненности, типу многолетнего режима, структуре баланса грунтовых вод наряду с особенностями природных и водохозяйственных условий.

Элементы водно-солевого баланса, являясь гидрогеологическими параметрами, в то же время тесно связаны с такими специальными науками, как почвоведение, биология, биофизика, геохимия, метеорология и др. Гидрогеологу трудно установить или учесть новейшие закономерности по каждой отрасли. Поэтому экспериментальные исследования должны осуществляться на основе научно-производственного комплексирования усилий специалистов. Только в этом случае может быть достигнут наибольший эффект, и изучаемый параметр получит качественную всестороннюю характеристику.

Комплексированию исследований уделялось недостаточное внимание, в результате этого многие стороны формирования процесса испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод оставались не раскрытыми, изученными частично, методические вопросы — нерешенными.

В 1951—1962 гг. широко применялись лизиметры с площадью сечения 0,1 $м^2$. С 1963 г. внедряются приборы — 1,0; 1,44; 2,0; 3,24; 5,2 $м^2$, среди которых наиболее распространен — 1,44 $м^2$. Влияние размеров приемной поверхности на интенсивность испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод не учитывалось.

Оптимальная площадь лизиметров не установлена, за исключением условий оголенной почвенной поверхности; она зависит от глубины залегания грунтовых вод, минерализации деятельного покрова, механического состава грунтов.

В методическом отношении и с точки зрения рентабельности получения декадной суммы двух-трехразовые замеры в сутки в лизиметрах в производственных и автоматизированных условиях наблюдений не оправдывают себя, достаточен одноразовый замер. При изучении суточного хода испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод целесообразно участить замеры до ежечасных с обеспечением достаточной и надежной точности измерений.

В централизованном способе замера испарения грунтовых вод точность прямо пропорциональна объему питающей емкости при одинаковой цене делений на шкале. Целесообразно использовать меньшие емкости, способные обеспечить суточный расход влаги с регулярной заправкой в сроки замера. Инфильтрация поверхностной воды резко уменьшает расход грунтовых вод даже в периоды интенсивной вегетации растений.

Ошибки лизиметрических наблюдений зависят от сложности гидрогеологических условий, метрических измерений, повторности опытов. В простейших — оправдана трехкратная, в сложных — шестикратная повторность.

В связи с эффектом трансформации воздушной массы и влиянием микроклиматических условий оптимальные размеры фоновой площади имеют определенное значение. В методическом отношении расположение ключевого участка в центре орошаемого поля оправдано.

Влияние механического состава на испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод бесспорно, однако в хлопковой зоне СССР специальные исследования в этом отношении не проводились. В Узбекистане получены предварительные результаты, характеризующие зависимость испарения от механического состава грунтов. Водопроводимость песчаных и супесчаных пород обратно пропорциональна размеру частиц или диаметру пор, в глинах молекулы воды малоподвижны.

Если грунты зоны аэрации представлены резко различными по механическому составу слоями (суглинок-галечник), то нормальное распределение интенсивности испарения нарушается. Это обусловлено различием капиллярных свойств и отрывом капиллярной каймы от покровных отложений.

На испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод растения влияют через зеленую массу и корневую систему. Немаловажна способность растений поглощать или отдавать влагу в окружающую среду без затраты тепловой энергии.

Влияние структуры грунта на процессы накопления и расходования воды еще не установлено. Имеются материалы, подтверждающие убыстрение процесса в насыпных грунтах, что стабилизируется со временем (три-четыре года) в связи с ирригационным уплотнением грунтов. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что за счет переуплотнения испарение в монолитах больше, чем в насыпных грунтах. Отклонения в том и другом случаях не превышают точности измерений и сказать что-нибудь определенное по данному вопросу трудно.

В хлопковой зоне СССР и на Украине установлено превышение ночного испарения грунтовых вод над дневным, что объясняется внутригрунтовым испарением, перераспределением влаги в зоне аэрации в охлажденном за ночь верхнем горизонте почвы.

Влияние минерализации воды на процесс испарения слабо изучено. Известны факты о том, что скорость движения в порах грунта зависит от химического состава вод: большая — в гидрокарбонатных, меньшая — в сульфатных, наименьшая — у содовых.

Инфильтрационное питание в вегетационный период значительно зависит от нормы полива, атмосферных осадков (зимой, вес-

ной и осенью), а также деятельной поверхности; в меньшей степени — от структуры грунтов.

Лизиметрический метод определения испарения грунтовых вод — наиболее приспособлен к условиям орошаемого земледелия. Он обладает рядом методических, конструктивных, определительских недостатков, для устранения которых необходимы экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях. Экспериментальные исследования не были обеспечены необходимой повторностью опытов. Работы не сопровождались синхронным и детальным изучением распределения влажности в зоне аэрации, что затрудняло достоверную оценку испарения с почвенной поверхности и установление зависимостей испарения от интенсивности водохозяйственных работ и природных факторов. Опыт подекадного фиксирования влажности грунтов в методическом отношении не оправдан.

Испарение грунтовых вод формируется под влиянием комплекса природных и водохозяйственных условий в зависимости от характера растительного покрова. Интенсивность испарения обычно уменьшается с увеличением мощности зоны аэрации, но в условиях выращивания люцерны второго и третьего года посева наблюдается прямая зависимость в связи с особенностями развития корневой системы.

Критическая глубина испарения грунтовых вод из-за недостаточности материалов исследований и отсутствия глубоких лизиметров не установлена.

В условиях близкого залегания грунтовых вод доля их участия в общем испарении с дневной поверхности значительная, с глубиной уменьшается, наибольшая — в лизиметрах с люцерной второго и третьего года посева и в некоторых случаях — с естественной растительностью.

Корреляционный и регрессионный анализ — наиболее достоверный метод — позволяет учитывать влияние произвольного числа факторов на величину испарения в их взаимодействии. Статистическая обработка данных не обеспечена достаточно длинным рядом наблюдений.

Несмотря на недостатки в условиях орошения, лизиметрический метод — наиболее надежный среди экспериментальных. Он вполне приемлем при оптимальной повторности научнообоснованной методики исследований, всестороннем и комплексном изучении процессов испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод с учетом особенностей гидрогеологических и водохозяйственных условий.

Большинство установленных зависимостей предварительное. Для их подтверждения, исправления и разработки новых сторон этого важного направления требуются дальнейшие эксперименты.

В ближайшие годы в Средней Азии необходимо создать региональную эталонную службу для проверки, сравнения и оценки характеристик элементов водно-солевого баланса, получаемых

на ключевых участках, испытания новейших приборов, разработки прогрессивных методов исследований. Первым шагом в этом отношении можно было бы считать установку большого гидравлического почвенного испарителя на территории одного из хлопкосеющих регионов.

В дальнейшем лизиметрические исследования должны развиваться по пути поиска оптимальных конструкций и автоматизации, способов дистанционного управления, что в конечном итоге повысит точность измерений, качество получаемой на ключевых участках информации. Необходимо разрабатывать конструкции взвешиваемых лизиметров с использованием принципа электромагнитных колебаний с последующим цифрованием импульсов.

В связи с неразработанностью способов перехода от данных лизиметров с переменным уровнем на площадь считаем целесообразным большую часть экспериментов проводить на установках с постоянным горизонтом воды, так как испарение и инфильтрационное питание рассчитывается на основе карт с фиксацией положения, относящихся к определенному периоду или дате.

Учитывая существенную зависимость капиллярных свойств от слоистости и большое влияние соотношения чередования легких, средних, тяжелых по механическому составу слоев на высоту капиллярного поднятия, необходимо:

детально изучать процессы инфильтрации, испарения грунтовых вод в слоистых грунтах;

организовать широкие эксперименты для изучения степени влияния минерализации и химического состава грунтовых вод на скорость движения водных масс в зоне аэрации;

исследовать критическую глубину испарения грунтовых вод с проведением опытов в различных почвенных, водохозяйственных и природных условиях;

для установления критической глубины изучать внутригрунтовое испарение;

уточнять и совершенствовать методику лизиметрических наблюдений:

проводить детальные исследования по установлению оптимальных размеров фоновой площади, организовывать опыты в различных зонах климатической увлажненности, ирригационно-хозяйственной освоенности и т. д.;

разрабатывать методы расчета испарения с почвенной поверхности по данным испарения грунтовых вод в условиях орошаемого земледелия в содружестве с другими научно-исследовательскими организациями.

Для достижения высокого уровня экспериментальных работ и результатов необходимо добиваться широкой комплексности исследований, объединения усилий научно-исследовательских, проектных институтов, научно-производственных объединений по мелиорации земель и эффективного внедрения нового, прогрессивного.

ЛИТЕРАТУРА

Айзенштат Б. А. [и др.]. Изменение теплового баланса деятельной поверхности при орошении. Труды ГГО, вып. 39/101. М., 1953.

Акопян А. С. К вопросу об определении испарения с поверхности суши при различных глубинах стояния уровня грунтовых вод. Труды ГГИ, вып. 135. Л., 1966.

Алиев Ф. Ш., Алирзаев А. А. О режиме и некоторых элементах баланса грунтовых вод на искусственно дренированных землях Кура-Араксинской низменности. Труды аспирантов и молодых ученых по гидрогеологии и инженерной геологии, вып. 1. Ташкент, 1970.

Алимов М. С. Лизиметр для изучения испарения грунтовых вод. «Гидротехника и мелиорация», 1965, № 5.

Алимов М. С. Лизиметры для изучения испарения грунтовых вод. В кн. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии аридной зоны СССР». Ташкент. 1966.

Алимов М. С. Основные принципы изучения водно-солевого баланса грунтовых вод орошаемых территорий. «Узб. геол. ж.», 1977, № 4.

Алимов М. С. О балансе подземных вод орошаемых территорий Узбекистана. «Узб. геол. ж.», 1976, № 4.

Афанасик Г. И., Шабан Н. С. [и др.]. Исследование процессов обмена влаги, газов и питательных веществ в системе почва — растение — атмосфера». В сб. трудов Союзводпроекта. М., 1974.

Архомейко А. И. Бузулуцкий бор. Т. III. М., 1950.

Бадов В. В. Основные этапы развития и современные представления об инфильтрации из шурфов. «Советская геология», 1975, № 4.

Бадов В. В. Одномерная инфильтрация в толщу пород с уменьшающейся по глубине проницаемостью. Труды ВСЕГИНГЕО, вып. 100. М., 1975.

Балаев Л. Г. Результаты экспериментальных исследований испарения воды с поверхности капиллярных менисков. «Почвоведение», 1963, № 2.

Барон В. А. Рекомендации по обоснованию состава и объемов работ. М., 1974.

Барон В. А., Ганиев К. Т. [и др.]. Рекомендации по обработке материалов наблюдений за режимом подземных вод и водно-балансовых исследований. М., 1977.

Беспалов Н. Ф. Орошение культур хлопкового севооборота в Голодной степи. Ташкент, 1970.

Бирюков Н. С. Опыт расчета суммарного испарения таежной зоны на примере лесного массива Кадниковского лесничества Вологодской области. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. III. Л., 1959.

Биндеман Н. Н. К определению запасов грунтовых вод зандровых и аллювиальных равнин. «Разв. и охрана недр», 1960, № 7.

Блэк К. А. Растение и почва. М., 1973.

Бондаренко Н. Ф. Физические основы мелиорации почв. Л., 1975.

Будаговский А. И. Испарение с поверхности растительного покрова. Труды ГГИ, т. III. М., 1959.

Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. М., 1964.

Будыко М. И. Влияние метеорологических факторов на испарение с увлажненной почвы. Труды НИУ, ГУГМС, сер. 1, вып. 25. М., 1947.

Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. М., 1948.

Будыко М. И. Климатические факторы физико-географического процесса.

Будыко М. И. Климатические условия увлажнения на материках. «Изв. АН СССР», сер. геогр., 1955, № 2, 4.

Будыко М. И. Климатические показатели аридности. Вопросы географии. Сборник статей для XVIII Международного географического конгресса. М., 1956.

Будыко М. И. Изменения климата. Л., 1974. Труды Главной геофиз. обсерватории, вып. 19. М., 1950.

Ван Бейвел К. Х., Майерс Л. Э. Лизиметр с автоматическим взвешивающим устройством. «Сельскохозяйственная техника», 1962, № 10.

Вашо Ж., Гелен П. Уравнение и математические модели в ненасыщенных грунтах. La Houille blanche, 1969, N 8, pp. 817—824.

Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. М., 1963.

Вершинин А. П. Горизонтальная изменчивость испарения на орошаемых сельскохозяйственных полях. Труды ГГИ, вып. 158. Л., 1969.

Водогрецкий В. Е., Крестовский О. И. Воднобалансовые экспедиционные исследования. М., 1975.

Волобуев В. Р. Введение в энергетику почвообразования. М., 1974.

Вольфцун И. Б. Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Л., 1972.

Ганиев К. Г. О результатах применения графиков Б. В. Полякова для определения суммарного испарения в Шахристанской котловине. М-лы Межведомственного совещания по проблеме изучения испарения с поверхности суши. Труды ГГИ. Л., 1961.

Григорьев А. А. О некоторых вопросах физической географии. «Вопросы философии», 1951, № 1.

Григорьев А. А. Географическая зональность и некоторые ее закономерности. «Изв. АН СССР», сер. геогр., 1954, № 5, 6.

Давыдов В. К. О коэффициентах редукции для плавучих испарителей. Труды ГГИ, вып. 7. М., 1938.

Доан Ж. Д., Вашо Ж. Метод непосредственной оценки водного баланса на базе измерения содержания воды и порового давления. 14 cme Congress International Association for Hydroulic Research. Paris, 1971, v. 5.

Джакелов А. К. Динамика и генезис влаги в зоне аэрации в песчаном массиве Муюнкум. «Изв. АН КазССР», сер. геолог., 1966, № 6.

Дзекунов Н. С., Файбишенко Б. А. Исследование процесса фильтрации в высоких монолитах лессовидных суглинистых грунтов. М-лы по геологии Украины, Казахстана, Кавказа и Забайкалья, сб. № 10. Киев, 1975.

Долгов С. И. О формах и состоянии почвенной влаги. «Почвоведение», 1943, № 9, 10.

Донецкая И. Н. Возможность понижения высоты капиллярного поднятия «пассивным электроосмосом». Труды Новочеркасского политехнического института, т. 322, Гидрогеология, инженерная геология. Новочеркасск, 1976.

Дмитриев С. И. Некоторые закономерности испарения влаги в порах почвы. Труды ЛГМИ, вып. 26, Л., 1964.

Ганиев К. Г. Комплексное изучение испарения в Шахристанской котловине. М-лы Межведомственного совещания по проблеме регулирования испарения с водной поверхности и почвы. Труды ГГИ, Л., 1964.

Ганиев К. Г. Испарение в средней и верхней частях бассейна р. Сырдарьи. Ташкент, 1974.

Гарднер У. Р. Развитие современной теории инфильтрации и ее применение в гидрологии. «Trangaerions of the A. SAE», 1967, V. 10, № 3.

Герасимов И. П. Аридные и семиаридные области СССР и их географиче-

ские аналоги. Вопросы географии. Сборник статей для XVIII Международного конгресса. М., 1956.
Герольд Л. Л., Дрейбелбис Ф. Р. Применение лизиметров для сельскохозяйственных гидрологических исследований. USDA, Tech. BUE, 1179, 1958.
Гольдберг В. М., Баскаков А. А. О фильтрационных свойствах глинистых пород в условиях переменных температур. Тезисы Научно-технического совещания по геотермическим методам исследования в гидрогеологии. М., 1975.
Горбунова И. Г., Серякова Л. П. Способы расчета испаряемости и суммарного испарения в Средней Азии. «Проблемы освоения пустынь», 1975, № 3.
Гребенюков П. Г., Иванов В. Н. Об оценке качества водно-балансовых исследований. «Изв. АН КазССР», сер. геол., 1976, № 1.
Григорьев А. А. Некоторые итоги разработки новых идей в физической географии. «Изв. АН СССР», сер. геогр. и геофиз., 1946, № 2.
Дмитриев С. И. Закономерности испарения влаги почвой при различной увлажненности ее поверхности. Труды ЛГМИ, вып. 26. Л., 1964.
Друэн Ж. Проблема водных ресурсов в Северо-Западной Африке. В сб. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара», М., 1955.
Дхир Р. Д. Гидрогеологические исследования в аридных и полуаридных областях Индии и Пакистана. В сб. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара». М., 1955.
Жакен Ц. Взаимодействие между глиной и жидкостями. Движение жидкостей в плотных глинах. Institum francais du petrole, Revue v. 20, N 10, 1955.
Зайнутдинов З. Режим естественного увлажнения Туранской провинции. Изв. Узб. географ. об-ва, т. XI. Ташкент, 1968.
Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л., 1967.
Зарадный Х., Шутор Ю. Влияние градиента температуры на движение воды в ненасыщенных грунтах и почвах. Archiwum hidrotechiki», 1973, т. 20, № 1.
Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М., 1972.
Зотимов Н. В. Использование гамма-поля земли для определения влагозапасов почво-грунтов. Труды ГГИ, вып. 189. М., 1971.
Иванов Н. Г. Испарение в естественных условиях. М., 1939.
Иванов Н. Н. Об определении испаряемости. «Изв. ВГО», т. 86, 1954, № 2.
Иванов Ю. Н. Метод расчета месячных сумм испарения с поверхности суши. Труды САРНИГМИ, вып. 35 (106). Ташкент, 1975.
Ильин Н. И. Достоверность оценки водопроницаемости горных пород. М-лы к научно-технической конференции по инженерным изысканиям. М., 1967.
Ингленд К. Б., Лисеен Э. Х. Исследование эвапотранспирации в штате Северная Каролина. «Сельскохозяйственная техника», 1963, № 3.
Ишанкулиев М. Режим влажности песчаных пустынных почв. «Проблемы освоения пустынь», 1975, № 5.
Каваниши Х. Влияние условий влажности на накопление грунтовых вод в ненасыпной зоне. «Оита дайгаку кенку гакубу кэнкю кис сидзен кагаку», 1971, № 1.
Капотов А. А. Оценка величины потерь стока на инфильтрацию в период весеннего половодья. Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. т. 6. Л., 1976.
Кац Д. М. Лизиметрические исследования в засушливых районах для целей мелиорации. М-лы Межведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с водяной поверхности и почвы. Труды ГГИ, М., 1964.
Кац Д. М. Контроль режима грунтовых вод на орошаемых землях. М., 1967.
Качинский Н. А. Физика почвы. Ч. II. М., 1970.
Качинский Н. А. Почва, ее свойства и жизнь. М., 1975.
Киселев П. А. Исследование баланса грунтовых вод по колебаниям их уровня. Минск, 1961.

Киселева И. К. Регулирование водно-солевого режима почв Узбекистана. Ташкент, 1973.
Ковда В. А. Происхождение и режим засоленных почв, М., 1947.
Ковда В. А. Уроки и опыт оросительных мелиораций. В сб. «Гидрогеологические исследования для орошаемого земледелия». Ташкент, 1968.
Козлов М. П. Суточный ход суммарного испарения с луга и его связь с метеорологическими факторами. Труды ГГИ, вып. 59, М., 1957.
Комарова М. В. Районирование территории Юго-Западного Причерноморья по степени аридности климата. Изв. ВсеГеО, т. 97, вып. 1. М., 1965.
Константинов А. Р. Испарение в природе. М., 1968.
Константинов А. Р., Пушкарев В. Ф. Об основных направлениях в изучении испарения с поверхности суши. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. III, Л., 1959.
Константинов А. Р., Астахова Н. И., Левенко А. А. Методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей. М., 1971.
Коньков Б. С. Испарение грунтовых вод на различной глубине залегания. «Социалистическая наука и техника», 1938, № 9—12.
Коссович П. С. Водные свойства почв. В кн. «Опытная агромелиорация», т. V. СПб., 1904.
Кохук Х. [и др.]. Дискуссия о лизиметре и библиография по их строительству и эксплуатации. Труды Американского отделения сельского хозяйства, № 372. Вашингтон, 1940.
Краков С. П. Опыты над движением в почве воды и растворов солей. «Почвоведение», 1901, № 1.
Крылов М. М. Основы мелиоративной гидрогеологии Узбекистана. Ташкент, 1959.
Крылов М. М. О критической глубине грунтовых вод в орошаемых районах. Труды ТашГУ, вып. 424, Ташкент, 1972.
Кузин П. С. График испарения с поверхности речных бассейнов и его применение к расчету среднего многолетнего стока. Труды ГГИ, т. XXI. Л., 1934.
Кузин П. С. Об испарении с поверхности почвы. Труды ГГИ, вып. 7. Л., 1938.
Кузнецов В. И. Результаты исследований испарения с накопителей промышленных стоков, засоленных и замкнутых водоемов». М-лы Межведомственного совещания по проблеме изучения испарения с водной поверхности, август. Л., 1968.
Кузьмин П. П. О методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова. Труды ГГИ, вып. 41 (95). Л., 1953.
Кузин В. Н. Местные воды пустыни и вопросы их использования. М., 1959.
Лайхтман Д. Л. Трансформация воздушной массы под влиянием подстилающей поверхности. «Метеорология и гидрология», 1947, № 1.
Лактаев Н. Т., Еременко Г. В. Разработка некоторых мелиоративных мероприятий по освоению земель Центральной Ферганы. Труды САНИИРИ, вып. 126. Ташкент, 1971.
Ланге О. К. Современное понимание «засушливой зоны» СССР и проблемы ее освоения. В сб. «Гидрогеология и инженерная геология аридной зоны СССР», вып. 4. Ташкент, 1975.
Липперт М. Влияние растительного покрова на новообразования грунтовых вод на примере Большой лизиметрической установки «Св. Арнольд» у Рейне. «Wasser und Baden», 1976, N 1, 5, 7, 9.
Литвиненко В. С. Использование подземных вод для орошения в странах аридного климата. ВНИИГЭ сельхоз. МСХ СССР. М., 1975.
Лебедев А. В., Добровольская Н. Д. Методические указания по применению лизиметров для изучения элементов баланса грунтовых вод. Труды ВСЕГИНГЕО. М., 1961.
Лебедев А. В., Барон В. А., Юсова Э. Н. Современное состояние теории влагопереноса в породах зоны аэрации и перспективы дальнейших исследований. Труды ВСЕГИНГЕО, вып. 83, ч. 1. М., 1975.
Лебедев А. В. Методы изучения баланса грунтовых вод. М., 1976.

Лебедева В. К. Исследование кинетики испарения жидкости из элементарных капилляров и капиллярно-пористых тел. Труды МГИИП. М., 1949.
Ленченко Г. П., Тищенко П. В. Исследование элементов водного баланса хлопкового поля в Южном Казахстане. Труды ГГИ, вып. 158, М., 1969.
Лундин К. П., Свердлова Л. Б. [и др.]. Проникновение атмосферных осадков в торфяную почву. Труды Белорусского ин-та мелиорации и водного хозяйства, вып. 16, Минск, 1968.
Лучшева А. А. Практическая гидрология. Л., 1959.
Львович М. И. Мировой водный баланс. Изв. ВсеГеО, т. 102, вып. 4, Л., 1970.
Маккавеев А. А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. М., 1971.
Материалы Межведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с поверхности суши. Л., 1961.
Материалы Межведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с поверхности суши. Л., 1963.
Материалы совещания по вопросам экспериментального изучения стока и водного баланса речных водосборов. Л., 1964.
Мирошниченко Ю. М. Влияние растительности на влажность почвогрунтов Восточных Каракумов. «Проблемы освоения пустынь», 1974, № 2.
Мичурин Б. Н. Энергетика почвенной влаги. Л., 1975.
Мезенцев В. С. Об уравнении связи между элементами водного и теплового баланса участков суши. Труды ОмСХИ, т. XVI. Омск, 1962.
Мейдж П. Распространение на земном шаре аридных и полуаридных гомоклиматов. В сб. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара». М., 1955.
Милькис Б. Е., Ахмедов Г. А., Туйчиев Т. К вопросу о зависимости суммарного испарения с орошаемого поля от суммарной радиации и радиационного баланса. Труды САНИИРИ, вып. 118, Ташкент, 1969.
Морган Д. Т., Гордон Д. Т. Влияние геометрии пор на относительную проницаемость для воды и нефти. «Journal of Petrolinue Technology», 1970, v. 22, № 10.
Морел-Сейтоу Х. Дж., Кэнджи Дж. Вывод уравнения инфильтрации. «Water Resources Resarch», 1974, V., 10, № 4.
Муминов Ф. А. Тепловой баланс и формирование урожая хлопчатника. Труды САРНИГМИ, вып. 50/65. Л., 1970.
Муминов Ф. А., Ибрагимов С. С. Зависимость суммарного испарения с хлопкового поля от метеорологических факторов. Труды САРНИГМИ, вып. 28 (109). Л., 1976.
Новиков В. А. Физиология растений. М., 1961.
Норзан М. Л., Войил Дж. Р. Плотность почвы после 30 лет в различных опытных (экспериментальных) условиях. Труды Американского общества почвоведения, т. 39, 1975.
Нерпин С .В., Чудновский А. Ф. Энерго- и массообмен в системе растения — почва — воздух. М., 1975.
Нерпин С. В., Мельникова М. К. Равновесие и движение влаги в почвогрунтах. Вопросы агрономической физики под редакцией А. Ф. Иоффе. Л., Сельхозиздат, 1957.
Огнева Т. А. О суточном ходе испарения с поверхности суши. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. III. Л., 1959.
Ольдекоп Э. М. Об испарении с поверхности речных бассейнов. Труды Юрьевской обсерватории. М., 1911.
Орлен В. Искусственное питание подземных вод в Южно-Африканской республике. «Farm. S. afr.», 47, 1971, № 2.
Парланг Д. Теория движения воды в почвах. Неустановившаяся инфильтрация из сферических полостей. «Soil Science USA», 1972, v., 113, № 3.
Парланг Д. Движение солей и воды в относительно сухой почве. «Soil Science USA», 1973, v., 116, № 4.
Парланг Д. Замечание об уравнении Грина и Эмпта. «Soil Science USA», 1975, v., 119, № 6.
Пашковский И. С. Методы определения инфильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации. М., 1973.

Пенман Х. Круговорот воды. В сб. «Биосфера». М., 1967.
Перцовский В. В. О точности гидродинамических расчетов. «Изв. высших учебн. завед.», геол. и разв., 1967, № 12.
Петров П. И. О наблюдениях над испарением без испарителей. «Метеорология и гидрология», 1941, № 6.
Планин Ю. Г. Результаты изучения суммарного испарения методом лизиметров на староорошаемых землях Вахшской долины. В сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Таджикистана», Душанбе, 1965.
Побережский Л. Н. К вопросу о зависимости суммарного испарения от глубины залегания грунтовых вод. Труды САРНИГМИ, вып. 25/106. Ташкент, 1975.
Попов О. В. О просачивании дождевой воды в почвогрунты и методика его изучения. Труды ГГИ, вып. 54/108/. Л., 1960.
Рабочев И. С. Некоторые параметры водно-солевого режима почв по данным лизиметрических исследований. Труды X международного конгресса почвоведов, т. X, М., 1974.
Рахимбаев Ф. М. Методика установления критического режима грунтовых вод. В сб. «Ирригация и вертикальный дренаж», т. 2. Ташкент, 1967.
Рачинский В. В., Белов Г. В. Исследование динамики переноса воды в почвогрунтах с применением трития методом меченой волны. «Изв. Тимирязевской сельскохозяйственной Академии», вып. 1, М., 1967.
Ревут И. Б., Масленкова Г. Л. [и др.]. Химические способы воздействия на испарение и эрозию почвы. Л., 1973.
Рейзвих В. Н., Попова А. Б. Испарение с водной поверхности в условиях Средней Азии. Труды САРНИГМИ, вып. 62/77/, Л., 1972.
Робинсон Г. М. Роль поверхностного натяжения в фильтрации. «Water and Sewage works», 1968, v. 115, № 6.
Роде А. А. Методы изучения водного режима почв. М., 1960.
Рогоцкий В. В. К оценке репрезентативности результатов лизиметрических наблюдений. Информационное письмо № 7. Ротапринт ВНИГЛ ГГИ. Валдай, 1972.
Рогоцкий В. В. Исследование влагообмена в зоне аэрации и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Труды ГГИ, вып. 196. Л., 1971.
Русин Н. П. Градиентный метод определения испарения с суши и его использование по сети станций. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. II. Л., 1959.
Русяев Н. И., Лисовин В. В. Методика составления карт инфильтрационного питания и испарения с уровня грунтовых вод. В сб. «Вопросы изучения режима подземных вод и инженерно-геологических процессов», вып. 49, М., 1972.
Рыкачев М. А. Новый испаритель для наблюдений над испарением травы и первые наблюдения по нему в Константиновской обсерватории в 1896 г. Записки АН, т. 7, № 3, 1896.
Саттаров М. А. Об одном способе вычисления инфильтрации и испарения и применение его для картирования грунтовых вод «Кулундинской степи. «Изв. Сибирского отделения АН СССР», сер. геол. наук, 1966, № 10.
Свортзенбрубер Д., Юнгс И. Сравнение трех уравнений инфильтрации. «Soil Science», v. 117, 1974, № 3.
Скворцов А. А. Об испарении и обмене в приземном слое атмосферы. Труды Ин-та энергетики АН УзССР, вып. 1. Ташкент, 1947.
Слейчер Р. Водный режим растений. М., 1970.
Сляднев А. Ф. Методы изучения баланса грунтовых вод. Ташкент, 1961.
Смайлз Д. Е. Одномерный вертикальный поток воды в насыщенных набухающих почвах. Transactions of the 10th International Congress of Soil Science. v. 1, 1974.
Смайлз Д. Е. Инфильтрация в набухающем материале. «Soil Science (USA)», 1974, 117, № 3.
Смирнова Н. В. Климатический очерк района работы экспедиции в совхозе «Пахта-Арал». Труды ГГО, вып. 33/101/. М., 1953.
Смирнов Р. А. Оценка методов определения инфильтрационного питания

грунтовых вод. «Водное хозяйство», 1966, № 49.
Собольч И., Лестак Я. Движение различных солевых растворов в почвенном профиле. «Water in the Unsaturated zone. Proceedings of the Wageniuge Symposium», Paris, Unesco, 1969, v. 2.
Сочеванов В. Е. Конденсация в песках Прискапийской низменности и методика ее определения. Труды ГГИ, М., 1938.
Струзер Л. Р. Оценка погрешности существующих методов определения испарения с почвы. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. III, Л., 1959.
Суюмбаев Д. А. Получение расчетных биологических коэффициентов испарения с помощью лизиметров. М-лы республ. научн. конф. по вопрос. мелиор. и води. хоз-ва. ч. 1. Фрунзе, 1968.
Суюмбаев Д. А. Лизиметры для мелиоративных исследований и их конструкций. В сб. «Приборы и методы балансовых исследований для мелиорации», ч. 1, М., 1972.
Субботин А. С. Конструирование и применение почвенных испарителей и лизиметров на современном этапе. Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда, т. 6. Л., 1976.
Стелман Р., Рид. Д. Установившаяся фильтрация в зоне аэрации. «Water Unsaturatod Zone Proceedings Symposium», 1969, т. 2.
Талсма Т. «Инфильтрация воды в почвах в полевых условиях. Труды X Международного конгресса почвоведов, т. I, М., 1974.
Текучев Ю. Б. О факторах, влияющих на влажность грунтов. Тр-ды Новочеркасск. политехн. ин-та, т. 298. Новочеркасск, 1975.
Тищенко П .В. Исследование влагообмена в зоне аэрации лизиметрическим методом на орошаемых землях. Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда, т. 6. Л., 1976.
Толстой М. П., Малыгин В. А. Основы геологии и гидрогеологии. М., 1976.
Топп Г. К. Гистерезис грунтовой влаги в пылеватых, глинистых и суглинистых грунтах. «Water Resources Ressearch», 1971, t. 7, № 4.
Туляганов Х. Т., Вишняков А. С. [и др.]. Подземные воды Кара-Калпакской АССР, Ташкент, 1975.
Тюрк Л. Баланс почвенной влаги. М., Гидрометиздат, 1958.
Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. М., 1953.
Федоров Б. В. О критическом режиме грунтовых вод. В сб. «Борьба с засолением орошаемых земель». М., 1967.
Федоров С. Ф. Испарение в условиях леса. Труды ГГИ, вып. 59. Л., 1957.
Фелициант И. Н. Опыт изучения закономерностей капиллярного передвижения воды и растворов солей в слоистых грунтах. Ташкент, 1961.
Фернандес де-Лара. Гидрология и использование водных ресурсов в аридных и полуаридных областях Латинской Америки. В сб. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара». М., 1955.
Филиппова А. К. Определение суммарного испарения с почвы методом водного баланса. Труды ГГИ, вып. 48/102/. Л., 1955.
Фролов Н. М. Гидротермия. М., 1968.
Фукуда Х. Особенности орошения в Японии. «Zeitschrift kulturtechnik», 1965, nef., № 3.
Харченко С. И. Суммарное испарение с различных угодий при оптимальном увлажнении почвы. Труды ГГИ, вып. 57 (III). Л., 1967.
Харченко С. И. Методика лизиметрических исследований. Труды ГГИ, вып. 135, Л., 1968.
Харченко С. И., Тищенко П. В. Экспериментальные исследования элементов водного баланса на орошаемых землях Нижнедонской оросительной системы. Труды ГГИ, вып. 125, Л., 1965.
Харченко С. И., Тищенко П. В. О методе лизиметрических исследований на орошаемых землях. Труды ГГИ, вып. 125. Л., 1966.
Харченко С. И. Исследование влияния орошения на водные ресурсы и водный баланс речных бассейнов, разработка методики определения возвратных вод и безвозвратных потерь. Труды ГГИ, вып. 208. Л., 1973.
Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. Л., 1975.
Харченко С. И., Субботин А. С. Применение лизиметров для исследования элементов водного баланса зоны аэрации. В сб. «Приборы и методы балансовых исследований для мелиорации», ч. 1, М., 1972.
Хасан К. Инфильтрация и истощение запасов воды в лизиметрах. «Soil Sci. Soc. Am. Proc.», 1969, 33, № 5.
Хиллел Д. Измерение гидравлической проводимости почвенного профиля in situ в ненасыщенном водой состоянии. Transactions of the 10th International Congress of Soil Science, v. 1, 1974.
Хиллс Е. Ш. Гидрология аридных и полуаридных областей Австралии. В сб. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара». М., 1955.
Хиллс Р. Влияние характера использования земли и характеристик почв на инфильтрацию и формирование поверхностного стока. «Journal of Hydrology, Amsterdam. 1971, т. 13, № 12.
Чайлд Э. Физические основы гидрологии почвы. Л., 1973.
Чаповская Е. В. Участие грунтовых вод в водопотреблении хлопкового поля. М-лы Межведомственного совещания — испарения с водной поверхности, почвы. Л., 1964.
Чураев Н. В. Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах. ДАН СССР, т. 148, 1963, № 6.
Шарапанов Н. Н., Черняк Г. Я., Барон В. А. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель. М., 1974.
Шау Ли Ю., Брутсаерт В. Анализ изменения испарения во времени с оз. Онтарио. «Water Resources Research», 1969, v. 5, № 4.
Шпак И. С. Влажность почвогрунтов на водосборах Придеснянской стоковой станции и методика ее учета. Труды УкрНИГМИ, вып. 15. Киев, 1958.
Шредер Л. Р. О расчете влагопереноса на ЭЦВМ. В сб. «Взаимодействие поверхностного и подземного стока», вып. 2. М., 1974.
Юсова Э. Н., Барон В. А. Некоторые результаты исследований процесса промачивания пород. Труды ВСЕГИНГЕО, вып. 50. М., 1972.
Creen W. H. and Ampt G. A. Studies on soil physics: I. Flow of air and water through soils. «J. Agr. Sci.», 1911, v. 4 (USA).
Kalweit H. «Der wasserhaushalt», Bd. I, Kap. 8, 1953.
Kohnke H., Dreibeldis F. R. A survey and discussion of lysimeters and bibliog on their construction and performance. U. S. dept. Agric., May. 1940.
Maschhaupt I. G. Lisimeter onderrobkingen aan het rijkslandbouw proofstation the Groningen en Elders. Vol. I, 1938, vol. 2, 1941, vol. 3, 1948, Verslagen Van Landb K. Onderroek.
Michna E. Pomiary parowania Wzdluz prosili poprzocznych doling sanu. Cz. II, 1964. V. XVII.
Nace R. Water at the World. «Natural History» Vol. LXXIII, No. 1, 1972.
Rose D. A. «Proceedings Wageningen Symposium, Water Unsaturated Zone», 1969, v. 1.
Schmidt W. Der Massenaustausch bei der ungeordneten Strömung in freier Luft und seine Folgen. Akad. der Wiess. Wien. Math—Nat. Kl. Sitzber. Abl. 2a, 1917.
Taylor G, Eddy motion in the atmosphere. Phie. Trans. Royal. Soc., A, 215, 1915.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. 3
Глава I. Общие природные условия. 8
Глава II. Результаты изучения испарения грунтовых вод . . . 35
Глава III. Научно-методические основы организации экспериментальных работ для изучения испарения грунтовых вод. . . . 161
Глава IV. Результаты многолетнего экспериментального изучения инфильтрационного питания грунтовых вод. 199
Заключение. 204
Литература. . . . . .

Кахрамон Ганиевич Ганиев

ИСПАРЕНИЕ И ИНФИЛЬТРАЦИОННОЕ ПИТАНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ)

Утверждено к печати

Ученым советом НПО «Узбекгидрогеология» Министерства геологии УзССР

Редактор *Л. Ежова*
Художник *Е. Владимиров*
Технический редактор *Х. Карабаева*
Корректор *Л. Финк*

ИБ № 662

Сдано в набор 10/IV-79 г. Подписано к печати 5/VI-79 г. Р07784. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл.-печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 14,0. Тираж 1000. Заказ 95. Цена 2 р. 50 к.
Адрес Изд-ва: 700047. Ташкент, ул. Гоголя, 70.
Типография Изд-ва «Фан» УзССР, Ташкент, проспект М. Горького, 79.