М. С. АЛИМОВ

ОПЫТ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ БАЛАНСА ГРУНТОВЫХ ВОД ОРОШАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ УЗБЕКИСТАНА

„ФАН“

ВВЕДЕНИЕ

Коммунистическая партия и Советское правительство придают большое значение развитию мероприятий, направленных на повышение продуктивности сельскохозяйственного производства путем применения современной техники орошаемого земледелия, механизации трудоемких работ, правильной организации труда. Они должны базироваться на научной основе, исходить из последних достижений гидрогеолого-мелиоративной науки и смежных дисциплин.

При гидрогеолого-мелиоративных исследованиях важно определение роли испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в водном балансе орошаемых территорий, установление процессов перемещения влаги и солей, нахождение количественных характеристик условий среды, в которой произрастают растения.

В данной работе автор поставил перед собой нелегкую задачу — выявить основные закономерности процессов испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в орошаемых районах, занятых хлопчатником, люцерной, естественной растительностью, кукурузой и почвой без растительности; разработать наиболее приемлемую конструкцию лизиметрической установки для дальнейшего развития балансовых исследований.

Лизиметрические наблюдения входят в комплекс стационарных гидрогеологических исследований гидрогеологических и инженерно-геологических партий Министерства геологии СССР, изучающих режим и баланс подземных вод орошаемых районов для оценки ресурсов подземных вод, обоснования мероприятий по борьбе с засолением и заболачиванием земель.

За последнее 20-летие в различных частях нашей страны проводились эксперименты в лизиметрах: Вахшской гидрогеологической станцией в долине р. Вахша изучались испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод по 74 лизиметрам круглого сечения площадью 0,3 и 0,4 м^2; Институтом водных проблем и гидротехники МВХ Армянской ССР — по 12 лизиметрам площадью 0,5 м^2; Государственным гидрологическим институтом — в районе оз. Валдай по 33 лизиметрам различной площади; Кайраккумской режимной партией — в северной части Таджикской ССР по 80 лизиметрам площадью 0,4 м^2; Азер-

байджанской гидрогеологической станцией — в Муганской степи Кура-Араксинской низменности по 74 лизиметрам круглого сечения площадью 0,5 и 1 м²; Приднепровской гидрогеологической станцией — в долине р. Днепра по 14 лизиметрам площадью 0,6 и 0,95 м²; Гидрогеолого-мелиоративной экспедицией Госземводхоза Украинской ССР — по 6 лизиметрам площадью 0,25 м²; объединением «Узбекгидрогеология» — в орошаемых районах Узбекистана по 247 лизиметрам квадратного и круглого сечения площадью 0,1—5,2 м².

Однако отсутствие достаточно обоснованной методики лизиметрических наблюдений, наиболее рациональной конструкции лизиметров, приборов для непрерывного учета испарения и инфильтрации препятствует получению достоверных данных по оценке элементов баланса — расхода подземных вод на испарение и пополнение последних за счет инфильтрации. В районах с необеспеченным подземным стоком и аридным климатом указанные недостатки, кроме того, затрудняют выявление причин вторичного засоления земель.

Предлагаемая работа состоит из двух частей. В первой даются результаты экспериментальных исследований процессов испарения грунтовых вод и их инфильтрационного питания, во второй — приведена методика лизиметрических наблюдений за процессами испарения грунтовых вод и инфильтрации атмосферных осадков, поливных и промывных вод в орошаемых районах.

Работа написана на основе лизиметрических и других балансовых исследований на опытном участке «Малек» Голодностепской гидрогеологической и инженерно-геологической партии, в которых автор принимал непосредственное участие в течение 1959—1965 гг., материалов Бухарской гидрогеологической станции по водному балансу оазисов Бухарской области.

На опытном участке «Малек» изучались испарение лизиметрическим методом и тепловой баланс деятельной поверхности; транспирация путем среза с последующим взвешиванием растений и хлор-кобальтовой пробы с использованием транспирометров Евтушенко, динамика влажности почвогрунтов зоны аэрации; велись градиентные и режимные наблюдения за уровнем грунтовых вод.

Исследования проводились в четырех испарительных павильонах, где установлены приборы и оборудование, позволившие получить богатый фактический материал по элементам водного баланса и баланса грунтовых вод. Используя опыт работы Малекского участка, девять гидрогеологических и инженерно-геологических партий Министерства геологии Узбекской ССР оборудовали лизиметрические установки во всех областях республики. На основе обобщения полученных ими данных составлен водный и водно-солевой баланс грунтовых вод орошаемых территорий Узбекистана. В нашей работе приводится его результирующая часть.

В проведении полевых работ участвовали М. М. Иногамов, Г. Е. Стефанович, Б. Мансуров, Л. Спиридонова.

ПОНЯТИЕ О ПРОЦЕССАХ ИСПАРЕНИЯ И ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

На протяжении значительного периода выяснению процесса испарения влаги деятельной поверхностью придавалось большое значение. Этому вопросу посвящены труды многочисленных исследователей. Однако процесс испарения грунтовых вод в условиях их неглубокого залегания в настоящее время слабо изучен, особенно для районов с недостаточным увлажнением. Это связано с несовершенством применяемых лизиметрических установок, методики полевых и лабораторных исследований, приборов автоматического регулирования уровня воды в лизиметрах и т. д.

В зависимости от приуроченности различают испаряющие поверхности открытых водоемов, снежных и почвенных, ледяных покровов, уровня капиллярной каймы, зеркала грунтовых вод, стеблей и листьев растений. Влага на испарение каждой из поверхностей расходуется с различной интенсивностью. При этом отмечено превращение влаги из жидкого состояния в парообразное. Количественное выражение парообразования определяется балансом открывающихся и поступающих молекул воды на испаряющей поверхности. При положительном балансе молекул воды протекает процесс конденсации, отрицательном — испарения. При равных значениях поступающих и отрывающихся молекул испарение численно равняется конденсации, которая в природе наблюдается весьма редко и непродолжительное время (осенне-зимний и весенний периоды).

Интенсивность превращения жидкой влаги в парообразную определяется главным образом тепловой энергией, ветровым режимом и насыщенностью влагой испаряющей среды.

Солнечная энергия (радиационный баланс), поступающая на деятельную поверхность, распределяется на поток тепла в почву, турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы и тепло, затрачиваемое на испарение или получаемое от конденсации.

Величина испарения с поверхности открытых водоемов зависит от расположения их в географической зоне, высотной отметки, глубины и размера водоема, наличия водорослей и естественной растительности. В районах с континентальным климатом испаре-

ние с открытых водоемов достигает 1400—1600 мм/год. В условиях заболоченных территорий с небольшой пленкой воды, не превышающей 2—3 см, размер испарения больше, чем с водной поверхности с глубоким дном.

Испарение грунтовых вод определяется главным образом глубиной залегания их уровня и высотой капиллярного поднятия. С увеличением глубины испарение уменьшается. Величина его зависит от скорости капиллярного потока влаги к дневной поверхности.

Капиллярное движение влаги в зоне аэрации может быть восходящее, нисходящее и смешанное. Восходящее движение наблюдается при отсутствии инфильтрационного питания грунтовых вод и наличии испарения, нисходящее — при отсутствии испарения и наличии инфильтрации, смешанное — при инфильтрации и испарении и сравнительно глубоком залегании уровня грунтовых вод. Смыкание этих двух противоположно движущихся капиллярных потоков обусловливает подъем уровня грунтовых вод.

Отметим, что при нисходящем движении капиллярной влаги помимо испарения с поверхности восходящих капилляров происходит испарение из нисходящих капилляров, уровень которых постепенно понижается.

Скорость капиллярного движения влаги в зоне аэрации определяет интенсивность испарения. С увеличением скорости восходящего капиллярного движения испарение увеличивается. В глинах несмотря на большую высоту капиллярного поднятия интенсивность испарения грунтовых вод меньше, чем в суглинках и супесях, так как скорость капиллярного движения в них низкая. При этом приход капиллярной влаги к поверхности меньше, чем расход на испарение. Кроме того, в условиях засушливого климата в связи с интенсивным испарением в капиллярных порах и на поверхности почвы откладываются соли. Поры грунта сужаются, восходящее движение влаги замедляется и тем самым уменьшается расход грунтовых вод на испарение.

Растительный покров усиливает интенсивность испарения путем транспирации. В орошаемых районах транспирация влаги растениями значительно превышает испарение с поверхности почвы.

К. А. Тимирязев (1892) отмечал, что «испарение воды растением вполне подчиняется физическим законам и что главнейшими факторами необходимо признать влажность атмосферы, ветер и нагревание солнцем». Присоединяясь к мнению К. А. Тимирязева, Н. А. Максимов указывает на то, что испарение воды растением осложняется рядом анатомических и физиологических особенностей строения поверхности растений, это важный физиологический процесс, способствующий передвижению минеральных солей от корня к листьям и регулирующий температуру листьев. Следовательно, в условиях недостаточного увлажнения, с высокой температурой воздуха летом, для поддержания температуры лис-

товой поверхности и тела растений, для их нормального развития затрачивается значительное количество влаги. Поэтому изучение доли участия транспирации в водном балансе орошаемых территорий представляет большой интерес.

Во многих работах транспирация определяется по формуле Дальтона

$$V = K = (F - f)\frac{760}{p}S, \qquad (1)$$

где V—испарение; K—коэффициент диффузии; F—упругость пара, насыщающего пространство; f — упругость пара в окружающем пространстве; P — давление воздуха; S — площадь испаряющей поверхности. Однако, как отмечает А. М. Алпатьев (1954), прямая и функциональная связь между испарением и листовой поверхностью растений в формуле Дальтона отсутствует.

Влага на транспирацию расходуется через мельчайшие отверстия (устьица) листьев растений. Устьица максимально раскрываются в ясные и теплые дни, ночью они закрываются, и транспирация резко ослабевает.

Научное представление об испарении влаги с деятельной поверхности можно получить, изучая процесс конвективного обмена воздушных масс, закономерности ярусности приземного слоя атмосферы, установленного А. А. Скворцовым (1964). Закономерности испарения и связь его с физическими и биологическими процессами можно установить при исследовании теплового баланса деятельной поверхности.

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИСПАРЕНИЯ И ТРАНСПИРАЦИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД В ОРОШАЕМЫХ РАЙОНАХ

В 1975 г. в Узбекистане общая площадь орошаемых земель составляла более 3000 тыс. га. Из них более 650 тыс. га подвержено вторичному засолению. Засоленные земли распространены в Голодной степи, центральной части Ферганской долины, низовьях Амударьи, южной части Шерабад-Сурхандарьинской депрессии, низовьях Кашкадарьи, Кермине-Канимехском, Бухарском и Каракульском оазисах, Дальверзинской степи. В этих районах грунтовые воды залегают неглубоко от дневной поверхности и характеризуются повышенной минерализацией. Благодаря интенсивному испарению верхние слои зоны аэрации засоляются.

Пример вторичного засоления — Голодная степь. До орошения, за исключением периферийной части конусов выноса предгорий Туркестанского хребта и пойменной террасы Сырдарьи, грунтовые воды залегали на глубине 7—25 м от поверхности. Почвы — типичные слабозасоленные и незасоленные сероземы (Димо, 1930). С развитием орошения уровень грунтовых вод интенсивно повышался, и земли подвергались вторичному засолению и места-

ми заболачиванию. Строительство дренажа значительно отставало от ирригации.

Испарение грунтовых вод в орошаемых районах происходит в двух формах: поверхностью почвы (физически) и транспирация растительностью (биологически). При физическом испарении грунтовые воды под влиянием капиллярных сил поднимаются в вертикальном направлении, стремясь к поверхности земли, и пополняют запасы влаги зоны аэрации. Под влиянием температуры воздуха и почвы влага, превращаясь в пар (молекулы воды), испаряется. С повышением температуры воздуха и верхних слоев почвы интервал между дневной поверхностью и верхней границей капиллярной влаги увеличивается, с понижением температуры — уменьшается.

Биологическое испарение определяется сосущей силой листьев и осмотическим давлением клеточного сока. Грунтовые воды превращаются в пар через мельчайшие поры (устьица) растений. Влага в растения поступает через корневую систему главным образом из зоны аэрации за счет капиллярной влаги. Интенсивность биологического испарения зависит в первую очередь от суммарного значения поверхности наземной части растений, размеров и глубины проникновения корневой системы.

В Узбекистане процесс испарения грунтовых вод изучали В. А. Ковда, М. М. Крылов, Л. М. Кац и И. К. Киселева, Н. А. Кенесарин, В. С. Коньков, А. Ф. Сляднев, А. А. Скворцов, Н. А. Филина, В. Р. Шредер, М. Ш. Шмидт, В. М. Легостаев, В. В. Федоров, Н. Н. Ходжибаев и др.

В данной работе рассматриваются особенности испарения и транспирации грунтовых вод в орошаемых районах на примере Голодной степи. Приводятся данные об инфильтрационном питании грунтовых вод за счет оросительных вод и атмосферных осадков, так как эти факторы значительно влияют на испарение. Кроме того, величина инфильтрации представляет большой практический интерес при водно-балансовых расчетах.

Основные методы исследований — лизиметрический, быстрого взвешивания срезанных объектов и хлор-кобальтовой пробы с использованием облегченных транспирометров Г. А. Евтушенко.

Лизиметрическим методом изучались испарение и транспирация грунтовых вод хлопковых, люцерновых, кукурузных массивов, земель с естественной растительностью и почв без растительности. Остальные методы применялись на хлопковых участках.

В геоморфологическом отношении экспериментальный участок «Малек» расположен в северо-западной части второй террасы Сырдарьи, так называемом Шурузякском понижении. Поверхность участка ровная с небольшим уклоном северо-западного направления. Водосодержащие породы представлены чередующимися суглинками, супесями, песками различной крупности, местами с включением гравия. Общая мощность четвертичных отложений 250—270 м. С поверхности до глубины 13—22 м вскрываются

средние суглинки. Ниже их залегают пески мощностью 26—30 м. В верхней части они мелко-, в средней — средне- и нижней — крупнозернистые. На глубине 48—68 м вскрыты плотные суглинки, переходящие местами в глины. До глубины 96 м суглинки подстилаются 15-метровым слоем песка с включением гравия. С глубины 111 до 254 м отложения представлены чередующимися песками и суглинками.

Водно-физические свойства покровных суглинков на участке расположения лизиметров следующие: пористость —42,7, удельный вес —2,67, объемный вес влажного грунта —1,91, объемный вес сухой породы —1,53, коэффициент пористости —0,74, гранулометрический состав фракций диаметром 0,10—0,05—19%, 0,05—0,01—53%, 0,01—0,005—11%, 0,005—0,002—7%, меньше 0,002—10%.

Участок орошается системой каналов «Малек» и М-9, берущих начало из магистрального канала им. Кирова. Минерализация оросительной воды в течение года изменяется от 0,5 до 0,7 г/л. Грунтовые воды с повышенной минерализацией залегают на глубинах 0,5—3,4 м от поверхности. Более глубокое их залегание наблюдается вдоль коллектора Шурузяк. В пределах испарительных павильонов уровень грунтовых вод колеблется в зоне интенсивного испарения на глубинах 0,7—2,3 м и активно влияет на почвообразовательный процесс. Максимальный уровень наблюдается в марте — апреле, минимальный — октябре — ноябре. Между максимумом и минимумом график режима уровня грунтовых вод имеет зубчатый вид с тремя, четырьмя подъемами, отражающими режим поливов. Минерализация грунтовых вод около хлопковых лизиметров в течение года изменяется от 5 до 7,4 г/л, люцерновых лизиметров — от 2,7 до 4,1 и лизиметров с оголенной почвой (без растительности) — от 14,2 до 17,7. По типу воды сульфатно-хлоридно-натриевые, на люцерновом поле — сульфатно-натриевые с повышенным содержанием хлоридов.

По климатическим условиям опытный участок относится к засушливой зоне с жарким летом и умеренной зимой. Среднегодовая температура не превышает 12—15°С. Абсолютный минимум температуры в декабре — январе снижается до 7—11°С, в отдельные холодные дни — до 15—17°С. Температура заметно повышается с апреля, наибольшего значения она достигает в июле, с июля до конца года — плавно понижается. От температуры зависит содержание влаги в воздухе. Низкая относительная влажность наблюдается в летний период, высокая — в осенне-зимний и весенний.

Так, в январе 1963 г. относительная влажность воздуха составляла 82%, температура —1,0°С, в июле — 48—50%, 26°С. Месячный максимум осадков часто отмечается в марте. Годовая сумма осадков не превышает 300 мм. Более 80% осадков выпадает в осенне-зимний и весенний периоды. С 1961 по 1965 г. более влажными были 1963 и 1964 гг. Осадки выпадают в виде дождя

и снега, в отдельных случаях — в виде града. Скорость ветра на участке не превышает 2,0—3,5, редко 5 м/сек; зимой направление ветра юго-восточное и южное, летом—северное, северо-западное.

Хлопковое поле

Повышение урожайности хлопчатника во многом зависит от правильного выбора агротехнических мероприятий, режимов орошения и оросительных норм, водно-солевого режима почв, микроклимата и др. Один из основных факторов формирования водно-солевого режима хлопкосеющих районов — глубина залегания, минерализация грунтовых вод и расход их на испарение.

Н. А. Кенесарин (1948, 1959) для сов. «Пахтаарал» установил, что различная транспирация хлопчатником и люцерны поразному влияет на сезонный режим уровня грунтовых вод. Транспирация хлопчатником не вызывает снижения их сезонного уровня.

Люцерна с большой транспирационной способностью снижает уровень грунтовых вод с марта — апреля. Максимальный уровень под люцерной наблюдается в сентябре. Величина транспирации люцерной за год достигает 12324 м³/га. Хлопчатник за июнь — сентябрь транспирирует 2527 м³/га влаги.

По М. М. Крылову (1959), испарение наблюдается до глубины 3,0 м от поверхности, величина его зависит от глубины залегания уровня грунтовых вод. Испарение увеличивается с марта, достигая максимума в августе. Он считает, что суточные испарения грунтовых вод при глубине уровня 1,5 м составляют 21 мм, испарение за август 87 мм, за год 384 мм. С изменением глубины залегания уровня на 0,10—0,20 мм соответственно увеличивается или уменьшается расход на испарение и транспирацию влаги в 2 раза.

Исследования И. К. Киселевой в с. «Пахтаарал» показали, что с 1. IV по 30. IX 1960 г. расход грунтовых вод хлопчатником составил при глубине залегания уровня грунтовых вод 1,0 м — 14500 м³/га, 2,0—3209 и 3,0—331. Расход оросительных вод для этих же глубин равен соответственно 2014, 4066 и 5315 м³/га. Урожайность хлопчатника с увеличением глубины уровня грунтовых вод уменьшается, для выбранных глубин уровня составляет 113,5, 56,1 и 34,2 ц/га. При одной и той же глубине уровня испарение изменяется в зависимости от урожайности и затрат оросительных вод. В лизиметрах с глубиной уровня 1 и 2 м зависимость испарения от урожайности имеет почти прямолинейный характер (Кац, 1963). Опыты проводились в лизиметрах с нарушенной структурой грунта. Площадь лизиметров 0,7 м², размер сторон 0,7×1м.

Для Бухарского оазиса Д. М. Кац установил связь между испарением и транспирацией грунтовых вод хлопчатником в за-

висимости от урожайности, глубины их залегания, подачи оросительных вод и температуры воздуха. При одинаковой глубине уровня транспирация нарастает с повышением урожайности или уменьшением подачи оросительных вод. Испарение грунтовых вод для глубин 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 и 3,0 м за апрель—октябрь составляет (среднее за 1954—1958 гг.) соответственно 987, 618, 179, 86 и 72 мм, оросительных вод — 396, 458, 530, 585, 633 мм. Площадь лизиметров 0,1 м², они заряжены монолитами агроирригационных слабозасоленных суглинков.

Х. А. Аманов лизиметрическими наблюдениями установил, что расход грунтовых вод на испарение хлопчатником за 1958—1960 гг. для Тедженского оазиса при глубине уровня 1, 2, 3 м составляет соответственно 413, 350 и 203 мм, оросительных вод — 371, 508 и 616 мм. С глубиной испарение грунтовых вод уменьшается, оросительных вод — увеличивается.

По И. С. Рабочеву (1955), при урожайности хлопчатника 30—50 ц/га суммарный расход влаги на испарение при глубине уровня 1,0 м равен 1241 мм, 2—747 и 3—657, в том числе оросительных вод (для тех же глубин) — 392, 464, 510 мм.

С помощью метода А. А. Скворцова на опытном участке Чимбай в Хорезмском оазисе Н. Н. Ходжибаев установил, что максимум испарения на хлопковом поле наблюдается в июле. Величина суммарного испарения с хлопкового поля за июнь, июль и август 1952 г. составляла 84, 87; 137, 44 и 79, 7 мм.

Для III террасы левого берега р. Вахша Ю. Г. Планин (1965) установил, что испарение грунтовых вод за апрель — октябрь на хлопковых массивах при глубине уровня 1 м составляет 612,3 мм; 1,5—319,1; 2,0—187,5; 2,5—126,2 и 3,0—3 мм. Он отмечает, что максимум испарения влаги хлопчатником наблюдается в июле. Опыты проводились в лизиметрах (64 шт.) круглого сечения площадью 0,4 м², толщина стенок 10 мм.

Результаты определения Е. В. Чаповской (1965) величины испарения грунтовых вод хлопковым полем отличаются от данных Ю. Г. Планина. За вегетационный период для условий Каралангского участка Курган-Тюбинского района величина испарения при глубине уровня грунтовых вод 1 м составляет 6680 м³/га; 1,5 м—4320; 2,0 м—2640; 3,0 м—987 м³/га. Суммарное испарение для этих же глубин равно соответственно: 13183, 11463, 11080 и 11947 м³/га. Урожайность хлопчатника 61,66 ц/га, 66,17, 66,73, 59,87 и 47,20. Опыты проводились в 24 лизиметрах площадью 0,49 м² (0,7×0,7 м) с заряженными грунтами нарушенной структуры.

М. В. Бабаев при исследованиях в лизиметрах площадью 4000 см² круглого сечения установил (Северный Таджикистан, Каттаганский участок), что при глубине уровня воды 0,5 м испарение грунтовых вод за апрель—октябрь составляет 1068 мм, 1,0—692, 1,5—518, 2,0—209, 2,5—145 и 3,0—21 мм. Испарение грунтовых вод, атмосферных осадков и оросительных вод для

этих же глубин соответственно равно 1598, 1450, 1323, 1020, 964 и 859 мм, а урожайность хлопчатника —47,1, 52,9, 59,5, 41,8, 36,1 и 39,1 ц/га. В опытах, проведенных на Хашим-Кульском участке в западной части Ферганской котловины, величины испарения грунтовых вод выше, чем на Каттаганском. Для принятых глубин уровня испарение грунтовых вод составляет соответственно 1514, 745, 318, 217, 113, 22 мм, суммарное испарение — 1934, 1264, 863, 809, 784, 746 мм.

Опыты по изучению закономерностей, формирующих испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод хлопковых полей, проводились лизиметрическим методом в трех испарительных павильонах. В третьем павильоне наблюдения велись по 10 лизиметрам площадью 0,1 м² с уровнем воды 1,0, 1,5, 2,0 м от поверхности, во втором — по 9. Уровень воды в лизиметрах поддерживался на глубине 3,0 м ниже поверхности. Площадь лизиметров составляла 0,36, 1,0, и 1,44 м².

В испарительном павильоне 4 установлено 36 лизиметров площадью 0,36, 1,0, 1,44, 2,0, 3,24 и 5,2 м². Уровень воды в них поддерживался на глубине 1,0, 1,5 и 2,0 м от поверхности. Структура грунта в 17 лизиметрах нарушенная. Повторность опыта в лизиметрах с нарушенной структурой грунта площадью 0,36, 1,44 м² двухкратная, площадь 1,0 м² — без повторности, уровень воды в них поддерживался на глубине 1,0 и 1,5 м.

Хлопчатник сеяли в лизиметрах и на прилегающем поле для создания микроклимата, аналогичного естественным условиям.

Количество растений выбиралось с учетом площади лизиметров: при 0,1 м² — одно гнездо с одним растением, в этом случае на один гектар посевной площади приходится 100 тыс. растений хлопчатника (Крылов, 1959), при 0,36 м² — одно гнездо с тремя растениями хлопчатника, при 1,44 м² — четыре гнезда с тремя растениями в каждом гнезде. Способ посева — квадратно-гнездовой. В лизиметре 12 растений, расстояние между гнездами хлопчатника 60 см. На один гектар посевной площади приходится 83 165 растений.

В лизиметрах площадью 1,0м² (1×1 м) хлопчатник сеяли квадратно-гнездовым способом (50×50 см). В лизиметрах четыре гнезда с тремя растениями в каждом. При расчете на один гектар посевной площади общее количество растений хлопчатника составляет 120 тыс. В остальных лизиметрах, за исключением четырех площадью 2,0 м², посев хлопчатника производился так же, как в лизиметрах площадью 1,44 м² квадратно-гнездовым способом, расстояние между гнездами 60×60 см. В лизиметрах площадью 2,0 м² (1,41×1,41 см) хлопчатник сеяли рядковым способом, расстояние между гнездами 15 см, между рядами 60 см.

Обработка почвы, внесение удобрений, поливы, культивация проводились в вегетационный период по графику агротехнических мероприятий сов. «Малек». Хлопчатник поливался водой из канала «Малек». Нормы и сроки поливов устанавливались с учетом фа-

зы развития хлопчатника. Поливные нормы колебались от 1000 до 1200 м³/га. Вода в лизиметры и на окружающие участки подавалась по бороздам в течение 1,5—2,0 суток. Во избежание проникновения поливных вод с поля в лизиметр или наоборот вокруг лизиметров устраивались «временные» валики из грунта. После полива их разравнивали. Борозды лизиметров и окружающих участков разрыхлялись и создавались такие же условия, как на возделываемом поле.

На участке наряду с изучением испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод проводились наблюдения за физиологическим развитием хлопчатника. В течение года заметное увеличение испарения грунтовых вод наблюдалось с июня, в августе оно достигало максимума. В это время происходит цветение и плодообразование хлопчатника. Корни растений, интенсивно развиваясь, проникают в более глубокие горизонты почвенного слоя и тем самым усиливают транспирацию грунтовых вод. Кроме того, суммарная листовая поверхность, постоянно увеличиваясь, достигает значительной величины. Увеличиваются солнечная радиация, дефицит влажности и температура воздуха.

За апрель — декабрь 1963 г. испарение грунтовых вод в лизиметрах с глубиной уровня воды 1 м составило 5294,9 м³/га; 1,5 м—3724,3 и 2 м —3587,3.

При появлении всходов и первых листьев (апрель) хлопчатник по лизиметру с уровнем 1 м израсходовал 387,56 м³/га грунтовых вод. В августе испарение достигало 1972,17 м³/га, ноябре (сбор курака и корчевание хлопчатника) — резко сократилось и составило всего 45,3 м³/га.

В лизиметрах с уровнем воды 1,5 и 2 м интенсивность испарения значительно ослаблена по сравнению с лизиметром, где уровень воды 1 м. В августе 1963 г. испарение грунтовых вод при глубине уровня 1,5 и 2 м равнялось соответственно 1761,63 и 1741,83 м³/га. В конце месяца средняя высота куста хлопчатника в лизиметре с уровнем воды 1 м составляла 58 см, 1,5 м—52,5 и 2 м —65. Листьев на одном кусте хлопчатника насчитывалось в среднем соответственно 35, 38 и 28 шт., нераскрывшиеся и зеленые плоды составляли 10, 10 и 9 шт. В естественных условиях в августе нераскрывшихся плодов было 11 шт. Урожайность хлопка к концу вегетации составила при тех же глубинах 30, 83, 30, 46 и 33,4 ц/га.

Сезонное испарение грунтовых вод увеличивается вслед за ростом и развитием хлопчатника (до августа), далее до октября несмотря на увеличение роста хлопчатника испарение уменьшается. В лизиметре с уровнем воды 1 м в апреле высота хлопчатника составляла 2 см, испарение грунтовых вод 387,56 м³/га, в июле соответственно — 20 см, 954,14 м³/га, в конце сентября, когда в лизиметре раскрылось более 70% плодов (64 коробочки),— 66 см, 1167 м³/га (рис. 1).

В лизиметрах с глубиной уровня воды 1,5 и 2 м эта зависимость выражается более отчетливо. В период цветения и плодообразования (август) высота растений при глубине уровня воды в

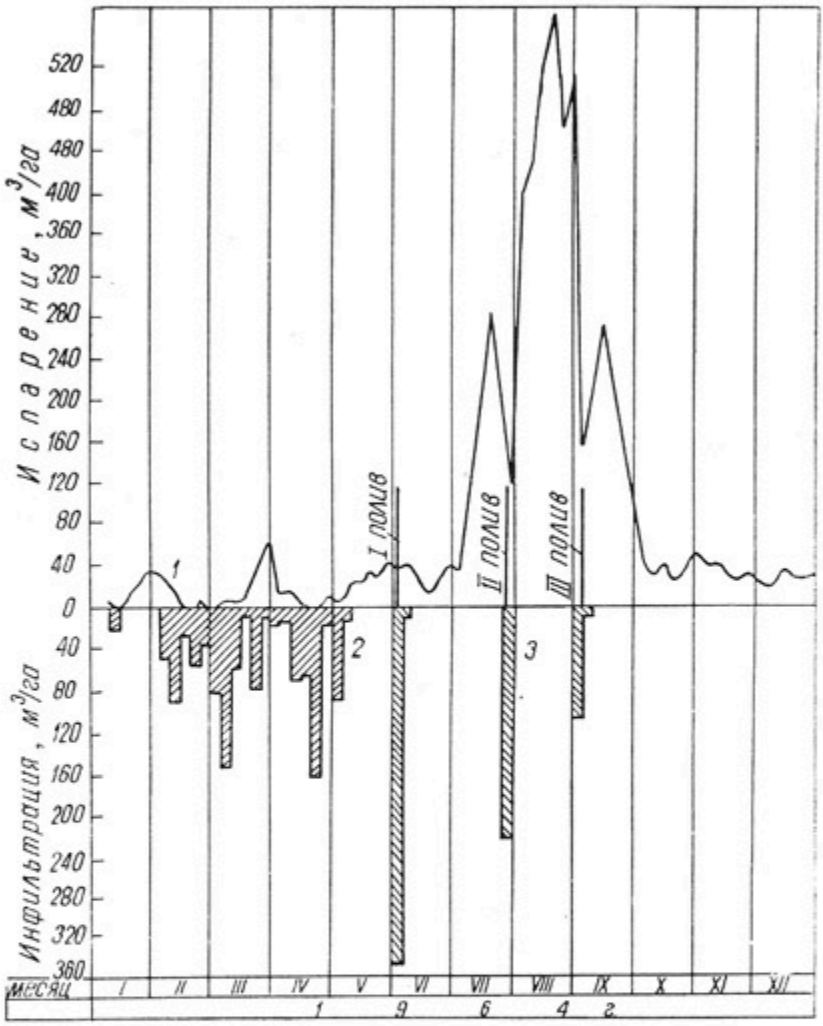

Рис. 1. График испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод по лизиметру 51 с уровнем воды 1,0 м.

1—испарение грунтовых вод, *2*—инфильтрация атмосферных осадков, *3*—инфильтрация поливных вод.

лизиметре 1,5 м составляла 57,5 см, испарение грунтовых вод — 1761,63 м³/га, сентябре, октябре—67,5 см, 1048,6 и 199,1 м³/га.

Таким образом, с июня по август физиологическое развитие хлопчатника характеризуется линией с незначительным наклоном к оси абсцисс, до октября график роста выполаживается, а испарение грунтовых вод резко снижается. Прямолинейная связь

испарения грунтовых вод хлопчатника с его суммарной листовой поверхностью подтверждается коэффициентом корреляции 0,72.

Коэффициент корреляции испарения и температуры воздуха за 1963 г. в лизиметре с уровнем воды 1,0 м составлял 0,29, температура почвы 0,35, скорость ветра 0,6, в лизиметре с уровнем воды 2,0 м — соответственно 0,35, 0,39, 0,22, для дефицита влажности —0,29.

Общая закономерность испарения грунтовых вод хлопчатником за 1964, 1965 гг. аналогична 1963 г. Цифровые значения расхода на испарение отличаются в результате изменения климатических факторов, режима орошения, физиологического развития растений и засоленности почвогрунтов зоны аэрации. Кроме того, с 1964 г. лизиметрические наблюдения, автоматизированные с помощью приборов конструкции автора, дают несколько отличные результаты.

В 1964—1965 гг., как и в 1963 г., максимум испарения грунтовых вод при глубине уровня 1, 1,5 и 2,0 м наблюдался в августе. За 1964 г. испарение при глубине уровня 1,0 м составляло 4309 м³/га, 1,5 м—3296,8 и 2 м —1487, среднемноголетнее испарение (1962—1965 гг.) для этих же глубин — соответственно 3923,4, 2572 и 2212,2 м³/га.

Следует отметить, что в 1965 г. хлопчатник в лизиметрах развивался слабее. На 20. VIII средняя высота кустов хлопчатника в лизиметре с уровнем воды 1 м равнялась 67 см, 1,5 м —51 и 2 м— 52. Насчитывалось 144 листа, 140, 128, больших кубышек хлопка —14, 5, 5 шт. на одном кусте. Поэтому испарение грунтовых вод было меньше, чем в 1964 г., но урожайность хлопчатника оставалась по-прежнему равной средней урожайности по совхозу, за исключением лизиметра с уровнем воды 1,0 м. В этом лизиметре урожайность при пересчете на 1 га составила 52,3 ц/га, в остальных двух —22,2 и 28,5 ц/га.

Закономерность испарения грунтовых вод в лизиметрах, заряженных грунтами нарушенной структуры, аналогична лизиметрам с монолитами. Однако размеры испарения и инфильтрационного питания в них значительно отличаются из-за более свободного развития корневых систем и высоких фильтрационных свойств нарушенных грунтов (табл. 1). Величина испарения грунтовых вод в лизиметрах 50, 61, 62 (рис. 2) с уровнем воды 1, 1,5 и 2,0 м за апрель—декабрь 1963 г. составляла 4777, 2104 и 1239 м³/га.

В этих же лизиметрах годовая инфильтрация атмосферных осадков до уровня грунтовых вод 82,2, 154,9 и 104,9 мм. Величина выпавших осадков за 1963 г. равна 193,3 мм. Коэффициент корреляции испарения с температурой воздуха 0,15, температурой почвы 0,11. По лизиметру 62 с уровнем воды 1 м коэффициент корреляции испарения с дефицитом влажности воздуха 0,15 и скоростью ветра 0,57. Такой низкий коэффициент указывает на ослабленное влияние на испарение грунтовых вод метеорологических факторов и подтверждает ранее высказанное мнение о зави-

симости испарения от интенсивности развития листовой поверхности хлопчатника.

Исследование испарения грунтовых вод при глубине залегания их уровня 3 м проводилось в испарительном павильоне 2, расположенном на незасоленных почвах вблизи канала «Малек». Здесь было установлено девять лизиметров площадью 0,36, 1,0 и

Таблица 1

Испарение грунтовых вод в лизиметрах с глубиной до уровня воды 3,0 м (хлопчатник) за 1965 год, м³/га

Номер лизиметра	Площадь, м²	Месяц						
		II	III	VI	V	VI	VII	VIII
83	1,44	—	—	—	11,3	—	343,8	2207,9
84	1,00	—	—	30,1	30,0	360,0	138,5	2301,0
85	1,00	—	—	17,0	18,0	130,0	914,0	2375,0
86	1,00	—	3,0	42,0	32,0	160,0	892,0	3303,0
87	0,36	13,6	14,0	25,0	—	55,9	22,4	—
88	0,36	5,6	19,4	44,6	42,0	164,0	215,1	3310,6
89	0,36	28,0	38,9	22,4	19,6	126,0	142,0	1174,0
90	1,44	—	—	—	4,14	235,0	571,8	1743,9
91	1,44	—	—	—	4,19	116,0	524,8	1631,7

Номер лизиметра	Площадь, м²	Месяц				Сумма	Урожайность хлопчатника, ц/га
		IX	X	XI	XII		
83	1,44	1841,9	1008,1	396,7	33,8	5843,5	63,6
84	1,00	2112,0	359,0	270,0	18,0	6934,1	69,5
85	1,00	1243,0	745,0	284,0	41,0	5767,0	51,2
86	1,00	2378,0	1062,0	396,0	46,0	8494,0	81,6
87	0,36	394,0	98,0	92,4	50,2	766,0	14,4
88	0,36	1718,3	363,6	126,0	53,2	6063,2	71,6
89	0,36	703,6	344,2	170,4	47,6	2817,5	20,6
90	1,44	1622,1	999,5	318,0	47,9	5542,04	56,2
91	1,44	1205,0	849,0	147,8	40,3	4519,69	43,4

1,44 м². Повторность опыта трехкратная. Вода, доливаемая в лизиметр, имела плотный остаток 0,61—0,87 г/л.

При принятых условиях опыта (пресные грунтовые воды в лизиметре и незасоленные почвы) испарение изменялось в больших пределах. Наибольшее испарение наблюдалось в лизиметрах с большой урожайностью, обусловленной лучшим развитием наземной части хлопчатника (табл. 2). В лизиметрах, кроме 87 и 91, высота куста растений на 30. VIII 1965 г. составила 75 см, ширина кроны 50—70 см, количество листьев 55—85 шт.

Наибольшее испарение грунтовых вод наблюдалось в лизиметрах площадью 1 м².

С мая по октябрь испарение составило: в лизиметрах площадью 1,44 м² и урожайностью 56,2—43,4 ц/га—5176,44; 0,36 м² урожайностью 71,6 ц/га—5814,8; 1,0 м² урожайностью 51,2—81,6 ц/га — 6682,6 м³/га. Максимум испарения во всех лизиметрах наблюдался в августе, причем увеличение испарения в этом месяце происходит весьма резко (рис. 2). В условиях незасолен-

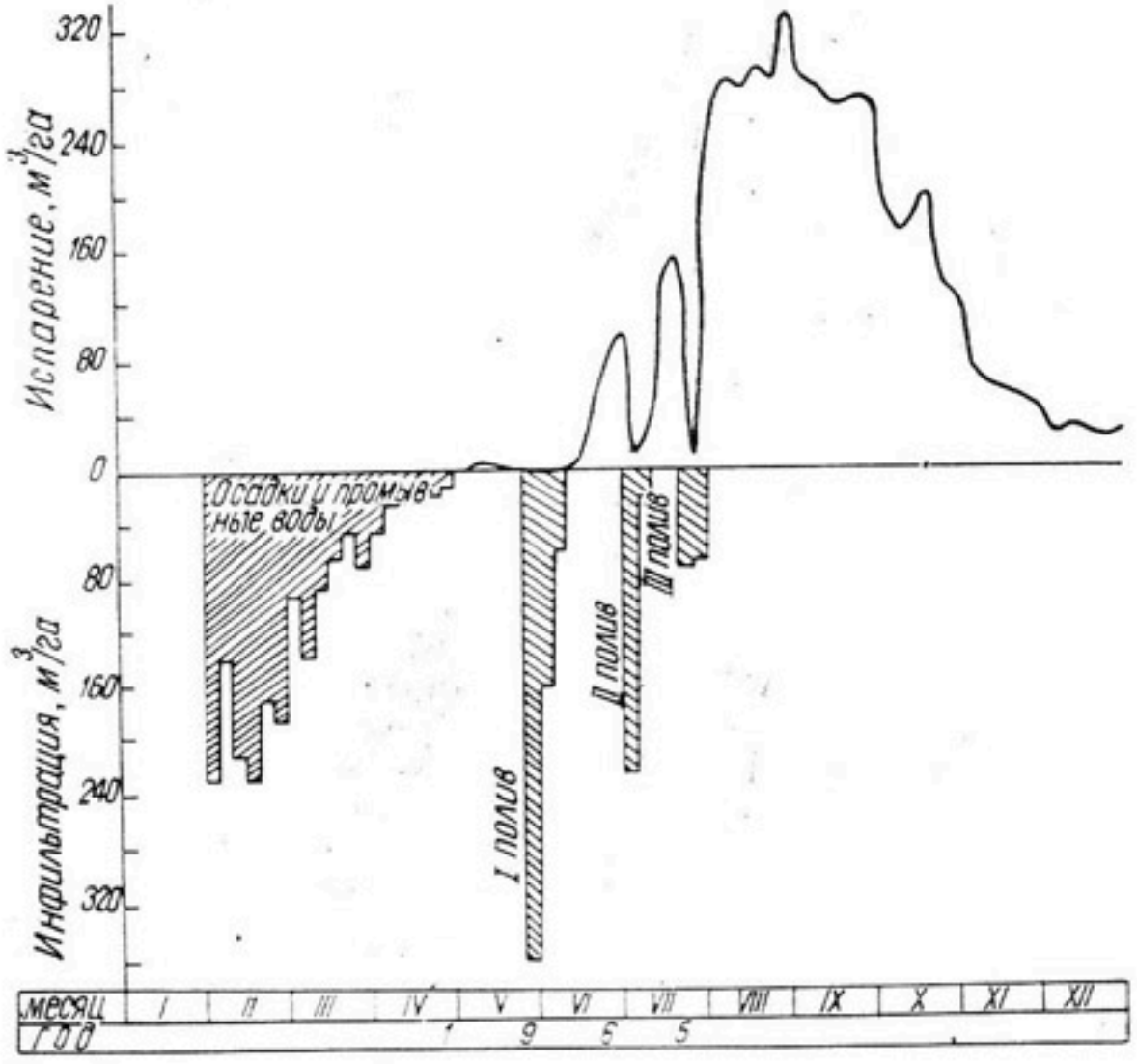

Рис. 2. График испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в лизиметре с хлопчатником с уровнем воды 3,0 м.

ных грунтов и грунтовых вод корневая система хлопчатника, проникая в более глубокие слои почв, интенсивно расходует грунтовые воды. Влага к растению поступает из зоны аэрации за счет капиллярной воды, высота поднятия которой на участке составляет 2,25 м, что вполне доступно корневым системам хлопчатника. В условиях незасоленных почв при глубине залегания грунтовых вод 2—3 м оросительную норму можно уменьшить, принимая во внимание, что растения в августе — сентябре используют пресную подземную воду. Это значительно ускорит созревание хлопчатника.

На испарение грунтовых вод существенно влияют вегетационные поливы, при которых оно резко сокращается, в отдельных слу-

чаях отсутствует в результате формирования экрана влагонасыщения в зоне аэрации инфильтрационными поливными водами.

В первые 3—6 дней после полива, в зависимости от глубины уровня воды в лизиметрах, наблюдается инфильтрация поливных вод. Капиллярное движение грунтовых вод к поверхности прекращается, растение обеспечивается влагой из зоны аэрации главным образом за счет инфильтрационных поливных вод.

Грунтовые воды пополняются за счет оросительных наиболее интенсивно при первых поливах в мае — июне (рис. 3). В это время транспирация хлопчатником составляет сравнительно не-

Таблица 2

Физиологические показатели развития хлопчатника в лизиметрах испарительного павильона 2 на 30.VIII. 1965 г.

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Средние показатели одного куста			Количество коробочек		Урожайность хлопчатника, ц/га
		высота, см	ширина кроны, см	количество листьев	раскрытых	зеленых	
83	1,44	98	76	87	3	13	63,6
84	1,00	90	50	54	3	9	69,5
85	1,00	71	53	56	3	7	56,2
86	1,00	87	69	66	6	16	81,6
87	0,36	36	32	28	—	5	14,1
88	0,36	76	58	59	—	16	71,6
89	0,36	81	70	65	—	11	20,6
90	1,44	93	60	66	6	6	56,2
91	1,44	59	39	34	4	4	43,4

большую величину, в связи с чем большая часть воды, поданная на орошение, питает грунтовые воды. В лизиметре 51 с уровнем воды 1 м, в котором выращивалось четыре гнезда хлопчатника, первый полив производился 1. VI. 1964 г. Норма полива 1200 м³/га. Из этого количества воды до уровня грунтовых вод просочилось 378 м³/га, а 822 м³/га задержано зоной аэрации. При втором поливе (21. VI) величина инфильтрации до грунтовых вод составила 240 м³/га. Третий полив произведен в конце августа. Количество инфильтрационных вод составило 120 м³/га, т. е. 10%. Остальная поливная вода израсходовалась на пополнение запасов влаги зоны аэрации и водопотребление хлопчатником.

После полива испарение грунтовых вод резко уменьшилось. По лизиметру 51 за четвертую пятидневку июня величина испарения достигла 287 м³/га. За шестую пятидневку июля (полив 21. VII. с нормой 1200 м³/га) испарение грунтовых вод понизилось до 120 м³/га, т. е. более чем в два раза. Такой же процесс наблюдался при третьем поливе (рис. 3). Соотношение испарения до и после полива составило 3,6, т. е. абсолютная величина понижения испарения грунтовых вод за пятидневку равна 380 м³/га.

Экспериментальные исследования показывают, что инфильтра-

ция поливных вод с глубиной увеличивается, причем эта закономерность наблюдается до глубины 2 м. В лизиметрах с уровнем воды 3 м инфильтрация значительно меньше, чем в двухметровом лизиметре. По мере физиологического развития хлопчатника увеличение инфильтрации с глубиной нарушается.

При первом поливе в лизиметрах с уровнем воды 1, 1,5 и 2 м (площадь лизиметра 1,44 м²) инфильтрационные воды составляют соответственно 336,4, 404,8 и 663,4 м³/га, при втором поливе инфильтрация с глубиной уменьшается до 97,2, 238,5 и 142,5 м³/га.

Таким образом, инфильтрация поливных вод с глубиной (до 1,5 м) при первом поливе увеличивается. При втором, третьем и т. д. поливах наибольшее питание грунтовых вод наблюдается при глубине уровня до 1 м. С ростом глубины уровня воды в лизиметре увеличивается подъем грунтовых вод. Так, при первом поливе в лизиметре с уровнем 1 м он составил 0,96, 1,5 м—1,48 и 2 м—1,33 м, при втором —0,79, 1,15 и 0,17 м.

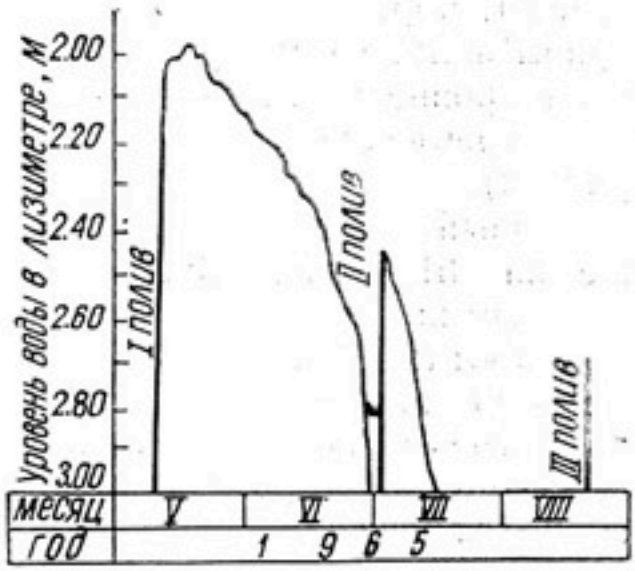

Рис. 3. График уровня грунтовых вод в условиях работы хлопкового лизиметра 83 с искусственно-переменным уровнем.

В четырех лизиметрах с искусственно-переменным уровнем проведены наблюдения за формированием инфильтрационного бугра и скоростью снижения уровня этого бугра в связи с расходом грунтовых вод на испарение. Инфильтрационные воды из лизиметров не выкачивались. Вентиль лизиметра, установленный между питательной и инфильтрационной трубами, плотно закрывали. Уровень воды замеряли по контрольной трубке три раза в сутки. Опыты проводились в лизиметрах с нарушенной структурой грунта. Площадь лизиметров составляла 2 м², размер сторон 1,41×1,41 м. Хлопчатник в течение вегетации 1965 г. поливался три раза, норма 1000 м³/га.

Первый полив произведен 15. V, второй—3. VII и третий — 7. VIII. При первом поливе на глубинах 1, 1,5, 2 и 3 м уровень грунтовых вод резко поднялся. Интенсивность подъема последнего с глубиной увеличивалась. В лизиметрах 45 с уровнем воды 1 м подъем грунтовых вод составил 0,79, 44 с 1,5 м—1,28, 43 с 2 м—1,23, 42 с 3 м —2,10 м. При втором поливе интенсивность подъема уровня, как при первом, с глубиной увеличивалась, но подъем был несколько меньше.

Время стабилизации уровней после поливов в зависимости от глубины смещается на 4—6 суток. Скорость движения инфильтрационных вод до уровня грунтовых составляет 0,7—1,3 м/сутки.

При третьем поливе (хлопчатник в лизиметре в стадии цветения и плодообразования) интенсивность подъема грунтовых вод за счет инфильтрационных поливных ослаблена. В лизиметре 45 после полива подъем уровня не наблюдался, 44— составил 0,4 м, 43—0,36 м. В лизиметре с уровнем воды 3 м поливные воды израсходовались на водопотребление хлопчатником.

Аналогичный опыт произведен в лизиметре с ненарушенной структурой грунта площадью 1,44 м². Уровень воды поддерживался на глубине 3 м от поверхности. В лизиметре насчитывалось 12 кустов хлопчатника.

Первый полив произведен 10. V, второй —1. VII и третий — 20. VIII, норма 1000 м³/га. Величина подъема грунтовых вод при первом поливе 1 м, при втором —0,56 м. Третий полив не отразился на уровне грунтовых вод. Поливные воды израсходовались на водопотребление растениями и испарение поверхностью почвы (рис. 3).

Первый инфильтрационный бугор испарился с 10. V до 30. VI, т. е. за 51 день. Скорость испарения с глубиной составила 0,5 см/сутки.

Сработка бугров с 20. V по 19. VI происходила более равномерно со скоростью 0,11 см/сутки, с 20 по 30. VI. уровень воды в лизиметре интенсивно снижался с 2,45 до 3,0 м со скоростью 0,59 см/сутки. Инфильтрационный бугор второго полива израсходовался на испарение в течение 14 суток (со 2 по 15. VII). Скорость снижения уровня составила 3,3 см/сутки.

Таким образом, с 10. V по 25. VII долив воды в лизиметры не производился, испарение грунтовых вод компенсировалось расходом на испарение инфильтрационных поливных вод. За остальной период наблюдений испарение грунтовых вод составило 5843,5 м³/га, оросительных—3000 м³/га.

По мере развития растений их водопотребление увеличивается, в связи с этим с июля уровень грунтовых вод на хлопковых массивах интенсивно снижается.

Большой интерес представляет закономерность расхода грунтовых вод на испарение за дневные и ночные часы. Опыты проводились в лизиметрах. Время определения ночных и дневных испарений выбиралось в зависимости от продолжительности солнечного дня.

В осенне-зимние и весенние дни количество ночных и дневных часов составляет 12. В летнее время продолжительность светового дня определялась восходом и заходом солнца.

С июня по сентябрь 1963 г. при глубине уровня воды в лизиметре 1 м сумма пятидневного ночного испарения хлопчатником меньше дневного. Наибольшее испарение наблюдается в августе. Ход сезонного ночного испарения аналогичен дневному. В июне сумма ночного испарения составила 135,8, дневного —231,5 м³/га.

К августу испарение грунтовых вод резко возрастает, за ночное время составляет 420,6 м³/га, дневное —1552,7 (рис. 3). В мае

и октябре дневное испарение в 1,5—2 раза больше ночного. По мере увеличения глубины залегания уровня воды в лизиметрах эта закономерность нарушается.

С июня по август при глубине уровня 1,5 м дневное испарение больше ночного, а с сентября по октябрь наоборот. Подобный ход испарения наблюдается в мае. Разница величины ночного испарения с дневным —15—20 м³/га, в сентябре —60—70 м³/га. За сентябрь 1963 г. дневная сумма испарения составила 469,4 м³/га, ночная —579,2 (табл. 3).

В лизиметре с уровнем воды 2 м с апреля по октябрь ночное испарение на 562,3 м³/га больше дневного (наибольшая разница

Таблица 3

Интенсивность ночного (числитель) и дневного (знаменатель) испарения грунтовых вод хлопчатником по лизиметрам, м³/га

Глубина до воды в лизиметрах, м	Месяц									Сумма за апрель—октябрь 1963 г.	Урожайность хлопка, ц/га
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
1,0	283,7 / 148,86	119,7 / 90,5	135,6 / 213,5	258,9 / 695,6	420,6 / 1552,7	291,2 / 796,1	184,4 / 96,66	45,3	—	1649,3 / 3593,92	33,4
1,5	9,72 / 32,61	65,2 / 55,3	43,7 / 56,99	176,2 / 184,6	732,2 / 1030,4	579,2 / 469,4	125 / 65,6	21,9	—	1731,22 / 1894,9	30,83
2,0	12,2 / 12,07	9,72 / 7,29	— / 2,43	351,7 / 274,6	971 / 873,9	521 / 260,7	174,7 / 47,03	126,33	15,8	2040,32 / 1478,02	30,46

наблюдалась в сентябре —260,3 м³/га). В августе при максимальном испарении грунтовых вод ночное превышало дневное лишь на 98 м/³га. По лизиметрам испарительного павильона 2 ночное увеличивается до 140—210 м³/га.

Таким образом, с апреля по октябрь при глубине грунтовых вод 1 м дневное испарение хлопчатником превышает ночное, при 1,5—2 м наоборот. Объяснить различие между величинами испарения дневных и ночных часов трудно, но можно предположить, что в природе существует связь солнечной энергии с грунтовыми водами: 1) восприятие тепла деятельной поверхностью; 2) передача воспринятого тепла на глубину; 3) компенсация тепла парообразованием.

На основании опытов по изучению развития растений от воздействия лучей Д. А. Сабинин (1963) отмечает, что «фотопериод—условие, действие которого может непосредственно сказываться лишь на освещаемых надземных органах. Но реакция на фотопериодические условия при клубнеобразовании осуществляется в частях растений, защищенных почвой от действия света».

Следовательно, в фотопериодической реакции клубнеобразования мы наблюдаем систему, в которой аппарат, воспринимающий действие внешнего условия, пространственно отделен от реагирующей части. Очевидно, структура фотопериодической реакции такова: восприятие раздражения; передача раздражения; реакция.

Видимо, передача воспринятого тепла на глубину, как следует из результатов лизиметрических наблюдений, осуществляется послойно. Вначале нагреваются верхние слои почвы, затем нижние. При неглубоком залегании уровня грунтовых вод (до 1,5 м) восприятие тепла и расход на парообразование днем интенсивнее, чем ночью. При глубине более 1.5 м грунтовые воды воспринимают тепло значительно позднее. Компенсация воспринятого тепла на испарение (реакция) осуществляется главным образом ночью.

А. Р. Константинов отмечает, что «транспирация в естественных условиях начинается с восходом солнца, достигает максимальных значений (0,5 мм/час) сразу после полудня и прекращается во время захода солнца. В ночное время транспирация отсутствует». Основой для такого вывода послужили опыты, проведенные в степной зоне Украины по изучению связи транспирации луга с характером облучения. Вопрос о прекращении транспирации растениями влаги в ночное время дискуссионный, особенно для хлопковых районов.

Если принять, что расход влаги растениями на транспирацию в лизиметрах сравнительно одинаков, то приращение суммарного испарения за ночные часы относительно дневных при глубине уровня воды больше 1,5 м происходит в результате возгонки пара из грунтовых вод в зону аэрации. Это объясняется тем, что скорость капиллярного притока в верхние слои почв при повышенной температуре воздуха ниже, чем испарение. Зона аэрации за дневное время интенсивно иссушается.

Ночью за счет положительного градиента температуры влага накапливается в зоне аэрации, а днем расходуется на испарение и транспирацию, так как расход ее в атмосферу с поверхности почвы и транспирация хлопчатником ночью составляют небольшую величину.

Суточный ход транспирации хлопчатником на опытном участке изучался совместно с Н. Г. Несветайловой. Экспериментальные исследования проводились в лизиметрах испарительного павильона 3 и естественных условиях в августе — сентябре 1961 г. тремя методами: 1) быстрого взвешивания срезанных объектов, разработанного Л. Л. Ивановым и широко внедряемого в практику исследований водного режима растений Н. Н. Бейдеманом; 2) хлор-кобальтовой пробы с помощью облегченных транспирометров, разработанных Г. А. Евтушенко и усовершенствованных Л. А. Шпотой (1958); 3) лизиметрическим.

Метод быстрого взвешивания основан на определении потерь воды на транспирацию за небольшой отрезок времени (несколь-

ко минут) одним или несколькими срезанными листьями (стеблями) растений. О величине расходов воды на транспирацию судят по изменению веса листьев во время опыта с единицы площади листьев.

$$Тр = \frac{B_1 - B_2}{m\Delta t \cdot w},$$

где Тр — величина транспирации, г/см^2/сек;
B_1 — вес листьев в начале опыта, г;
B_2 — то же в конце опыта, г;
m — число листьев;
Δt — продолжительность опыта, сек;
w — площадь листьев, см^2.

Второй метод основан на учете количества воды, израсходованной листьями на транспирацию путем взвешивания впитывающей ее хлор-кобальтовой влагочувствительной бумаги. Размер ее выбирается с учетом диаметра резинового кольца транспирометра.

Лизиметрический метод основан на учете расхода воды из лизиметра только на транспирацию при закрытой поверхности почвы влагонепроницаемым материалом (полиэтиленовая пленка, покрытая сверху грунтом). Таким образом, исключалась возможность расхода влаги на испарение поверхностью почвы лизиметра. Эксперименты проводились в лизиметре с глубиной залегания уровня воды 1 м. Приводим результаты параллельного определения дневных расходов влаги на транспирацию:

	Количество воды, израсходованной на транспирацию 100 г зеленой массы листьев хлопчатника	
	по хлор-кобальтовому методу	*по методу срезанных объектов*
22. VII	2,290	0,980
4. VIII	1.510	0.655
7. VIII	2,220	1,130
13. VIII	1,850	1,756
22. VIII	1,740	1.811
30. VIII	1,590	1,655
2. IX	1,600	1,540
7. IX	0,550	0,259
10. IX	0,710	0,316
15. IX	0,670	0,324

Оба эти метода характеризуют общую закономерность изменения транспирации с 22. VII по 15. IX. 1961 г., однако хлор-кобальтовый метод дает завышенные результаты. Наибольшая транспирация влаги хлопчатником наблюдается с 7. VIII по 7. IX, с 7 по 15. IX, величина транспирации уменьшается, что объясняется созреванием хлопчатника к этому времени, в связи с чем уменьшается потребность растений в воде.

Таблица 4

Результаты определения величины транспирации на 1 г листа в минуту и общий расход кустом хлопчатника за день

Дата	Время наблюдений, час	Площадь листьев на солнце	Расход воды 1 м² листа (г/мин.) на солнце	Расход воды за 1 мин.		Общий расход воды за день, л
		в тени, см²	в тени, мг	по срокам наблюдения, мг	среднее за день, мг	
21.VIII	8,00	3663	0,473	1740	1910	1,49
	11,00	2928 / 735	1,047 / 0,56	3540		
	14,00	1832 / 1832	0,713 / 0,65	2500		
	20,00	— / 3663	— / 0,297	2070		
24.VIII	8,00	3663	0,473	1740	2208	1,716
	11,00	1832 / 1832	0,847 / 0,66	2530		
	14,00	2720 / 943	1,33 / 0,6	4230		
	17,00	— / 3663	— / 0,38	1760		
	20,00	3663	0,2	730		
26.VIII	8,00	3663	0,547	2000	2520	1,965
	11,00	3663	1,06	3900		
	14,00	1832 / 1832	1,303 / —	3600		
	17,00	3663	0,547	2000		
	20,00	3663	0,303	1100		
1.IX	8,30	3663	0,50	1830	2230	1,600
	11,00	1832 / 1832	0,947 / 0,497	2660		
	14,30	733 / 2930	1,133 / 0,67	2770		
	17,00	733 / 2930	0,86 / 0,327	1590		
	19,30	3663	0,703	2300		
4.IX	9,00	3663	0,373	1390	1790	1,290
	10,30	3663	0,55	2020		
	12,30	918 / 2745	0,833 / 0,427			

Продолжение таблицы 4

Дата	Время наблюдений, час	Площадь листьев на солнце	Расход воды 1 м² листа (г/мин.) на солнце	Расход воды за 1 мин.		Общий расход воды за день, л
		в тени, см²	в тени, мг	по срокам наблюдения, мг	среднее за день, мг	
	14,00	1832	0,587	2220		
		1832	0,45			
	16,00	3663	0,50	1830		
	18,00	3663	0,433	1630		
	19,30	3663	0,383	1410		
7.IX	9,00	1221	0,447	1540	1670	1,201
		2442				
	10,00	3663	0,567	2080		
	12,00	3663	0,50	1830		
	14,00	3663	0,50	1830		
	16,30	3663	0,40	1470		
	18,00	3663	0,457	1680		
		3663				
	19,45	3663	0,35	1280		
10.IX	9,00	3663	0,313	1150	1260	0,831
	10,30	3663	0,377	1350		
	14,00	3663	0,383	1410		

При сравнении результатов лизиметрического метода и хлор-кобальтовой пробы получены такие же соотношения, т. е. второй метод дает завышенные величины.

Транспирацию листьями хлопчатника определяли в двух лизиметрах. Уровень воды в них поддерживался на глубине 1,0 м от поверхности. Высота куста хлопчатника к моменту опыта составляла 45 см, а количество листьев соответственно 47 и 32 шт. Общая площадь их 3663 см².

За транспирацией в лизиметре наблюдали с 22 по 27. III и с 1 по 12. IX. 1961 г. С 28 по 31. VIII полиэтиленовая пленка с лизиметра снималась. Транспирация листьями хлопчатника определялась на солнечной и теневой стороне. Затем вычислялась среднеарифметическая величина транспирации в сутки (табл. 4).

Транспирация влаги хлопчатником, определенная хлор-кобальтовой пробой, днем варьирует в больших пределах (табл. 4). Однако, как и по методу срезанных объектов, с 22. VIII транспирация увеличивается и достигает наибольших величин (26. VIII—1,965 л). До конца опыта она постепенно уменьшается и 10. IX составляет 0,831 л.

Следовательно, транспирация влаги хлопчатником в августе (цветение и плодообразование) больше, чем в сентябре (плодообразование и созревание). Это подтвердилось лизиметрами площадью 1,44 м² испарительного павильона 4.

Среднесуточное испарение хлопчатником в течение года варьирует в больших пределах, с увеличением уровня грунтовых вод уменьшается. Большие суточные испарения наблюдаются в августе в период цветения и плодообразования хлопчатника. Низкое суточное испарение наблюдается в апреле — мае.

Среднесуточное испарение за май — октябрь при глубине уровня воды 1,0 составляет 26,8 м³/га, 1,5 м—20,3, 2,0 м— 18,79 (табл. 5).

Суммарное значение транспирации, полученные хлор-кобальтовой пробой и лизиметрическим методом, до 22. VIII—27. VIII

Таблица 5

Интенсивность среднесуточного испарения грунтовых вод хлопчатником по лизиметрам Малекского опытного участка (вегетационный период 1963 г., м³/га)

Глубина уровня грунтовых вод, м	Месяц						Среднесуточн. за май—октябрь	Урожайность хлопчатника в лизиметре, ц/га
	V	VI	VII	VIII	IX	X		
1,0	6,8	11,6	30,8	65,76	36,2	9,6	26,8	33,4
1,5	4,0	4,0	14,2	58,7	34,9	6,5	20,3	30,83
2,0	0,6	0,8	20,4	58,08	25,6	7,3	18,79	30,46

составляют соответственно 10,607 и 5,2 л. Соотношение их выражается как 2:1. Более близкие величины транспирации получены во втором опыте с 1. IX по 12. IX. 1961 г. и составляют 1,6, 1,0, т. е. сумма транспирации хлор-кобальтовой пробой равна 13,9 л, лизиметрической —8,30.

Таким образом, по хлор-кобальтовой пробе определения транспирации хлопчатником получают завышенные результаты в отличие от метода срезанных объектов и лизиметрического.

Суточное испарение грунтовых вод изучалось в лизиметрах 7. VIII. 1964 г. (через 15 дней после второго полива хлопчатника). Замеры проводились через каждые два часа (доливом воды по питательной трубе). При глубине уровня воды в лизиметре 1 м с 10 до 16 час. испарение грунтовых вод резко возросло и достигло максимума в 16 час. (рис. 4). До 24 час. кривая испарения постепенно падает. С 24 до 2 час. следующего дня расход грунтовых вод наименьший, с 2 до 8 час. наблюдается второй пик испарения, но его значение на 1,53 м³/га меньше первого. График суточного хода испарения грунтовых вод при глубине уровня 1 м имеет вид синусоиды. За 7. VIII 1966 г. испарение составило 15,66 м³/га.

В лизиметре с уровнем воды 1,5 и 2 м синусоидальный вид графика нарушается. При глубине уровня 1,5 м с 12 до 24 час. грунтовые воды испаряются сравнительно равномерно со скоростью 0,58 м³/га. С 24 до 4 час. испарение грунтовых вод уменьшается,

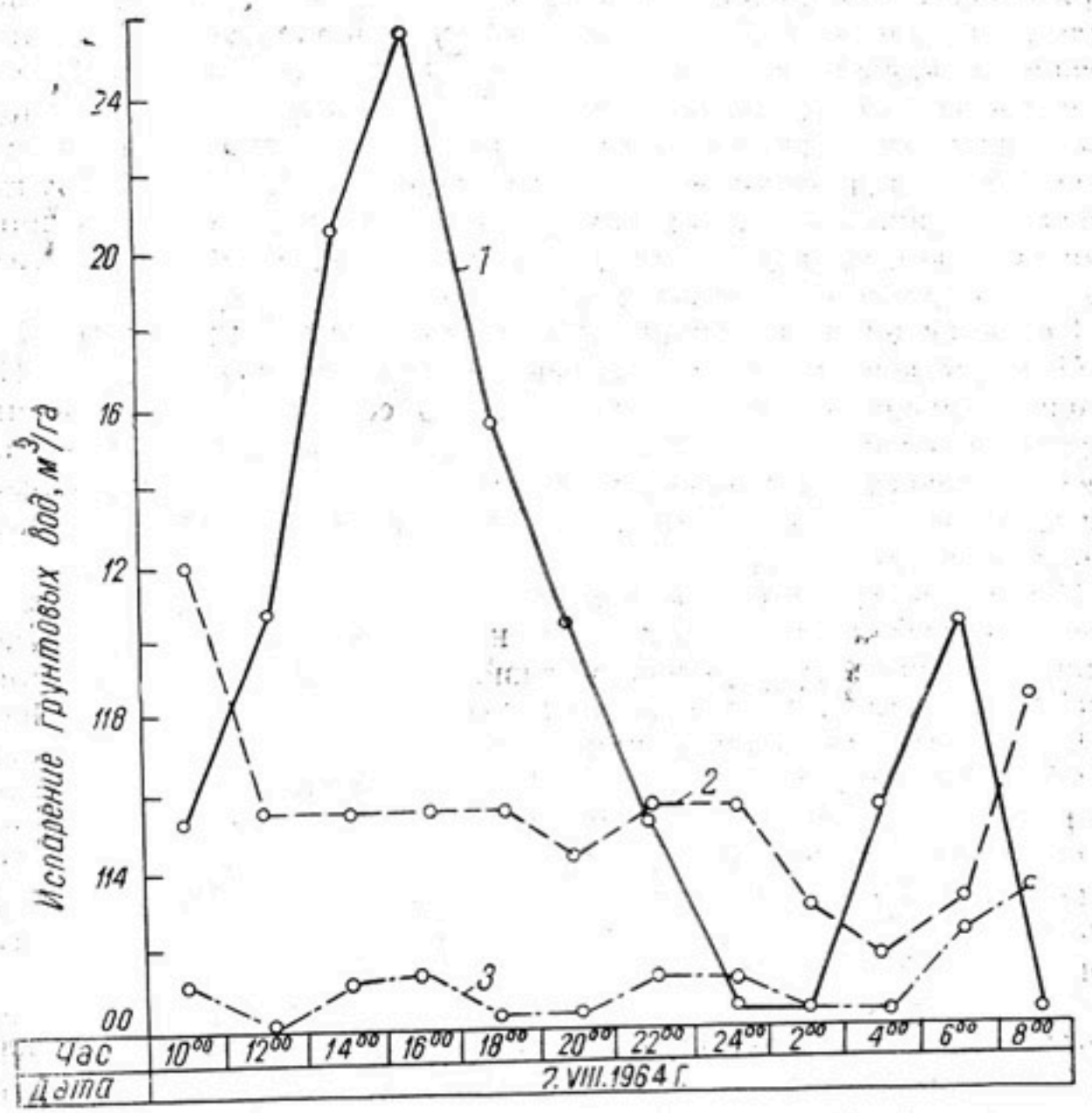

Рис. 4. Суточный ход испарения грунтовых вод хлопчатником с глубины 1,0 м (1), 1,5 (2), 2,0 м (3) от поверхности земли, площадь лизиметра 0,36 м², размер сторон 0,6×0,6 м.

с 4 час. утра — увеличивается. Подобное изменение испарения наблюдается также при глубине уровня воды в лизиметре 2 м.

Величины испарения грунтовых вод (рис. 4) заниженные, так как хлопчатник в лизиметрах (57, 58, 59) развивался угнетенно. Несмотря на это, данные лизиметрических наблюдений позволяют сделать вывод о том, что суточное испарение, как и сезонное, с увеличением глубины уровня воды уменьшается. При глубине залегания грунтовых вод 2 м ночное испарение больше дневного, при глубине 1 и 1,5 м наоборот.

Люцерновые массивы

Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод люцернового поля исследовались с 1961 по 1963 г. в лизиметрах испарительного павильона 3 и 4. В 1963 г. лизиметров с люцерной было 24 шт., из них 10 (площадь 0,1 м²) расположено в испарительном павильоне 3, а 14 (0,36, 1,0, 1,4, 2,0 м²) — в павильоне 4.

В третьем испарительном павильоне из 10 лизиметров 4 заряжены грунтами нарушенной структуры, 6 — ненарушенной, в четвертом 8— с нарушенной, 6— с ненарушенной структурой грунта. Описание динамики испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод приводится по результатам наблюдений в лизиметрах с ненарушенной структурой грунта.

Посев люцерны в испарительном павильоне 3 произведен 3—4. III. после вспашки и боронования. Всходы получены 14—15. III. Развитие люцерны нормальное, подобно естественным условиям. Наряду с лизиметрическими наблюдениями изучалось физиологическое развитие люцерны, главным образом рост. Минерализация грунтовых вод в лизиметрах в течение опыта поддерживалась в интервале 3—7 г/л.

Испарение грунтовых вод люцерной увеличивается с марта—апреля и достигает максимума в июле — августе. Значительная величина испарения отмечена в лизиметрах с люцерной второго года посева. Если испарение люцерной первого года посева (1961 г.) за май — ноябрь при глубине уровня 1,0 м составляет 5164,9 м³/га, второго (1962 г.)—13 238, третьего —9826, при глубине 1,5 м это различие в испарении по годам посева выражается еще резче: в первом году посева—2484 м³/га, втором—31 919 и третьем —12 806. При глубине уровня воды в лизиметре 2,0 м испарение люцерной первого года посева составляет 1621,0 м³/га, второго—24 383,6 и третьего —14 696.

Годовое испарение грунтовых вод люцерной второго года посева при глубине уровня воды 1 м равно 19 645 м³/га, 1,5 м — 35 449 и 2,0 м — 26 420. Урожайность для этих же глубин соответственно составляет 145,4, 195,1 и 163,9 ц/га.

Величина испарения люцерной третьего года посева больше первого, но меньше второго. Это объясняется особенностями физиологического развития корневой системы и зеленой массы люцерны второго года посева.

Испарение люцерной первого года посева с увеличением глубины залегания уровня грунтовых вод уменьшается и на глубине 2,0 м составляет 1621 м³/га. На второй год посева благодаря интенсивному развитию корневой системы и зеленой массы испарение люцерной с глубиной (кроме 2,0 м) увеличивается. На третий год посева испарение при глубине уровня 1,0 м больше, чем при 1,5 м, но меньше, чем при 2,0 м. Максимум испарения в большинстве случаев наблюдается в июне — июле (рис. 5).

Инфильтрация атмосферных осадков и поливных вод значительно меньше, чем в хлопковых лизиметрах. Годовая инфильтрация атмосферных осадков при глубине уровня воды 1 м не превышает 15—18%, 1,5 м—7—8, 2 м—4—5 от суммы выпавших осадков. Инфильтрация атмосферных осадков наблюдается главным образом зимой. Основная масса осадков задерживается в зоне

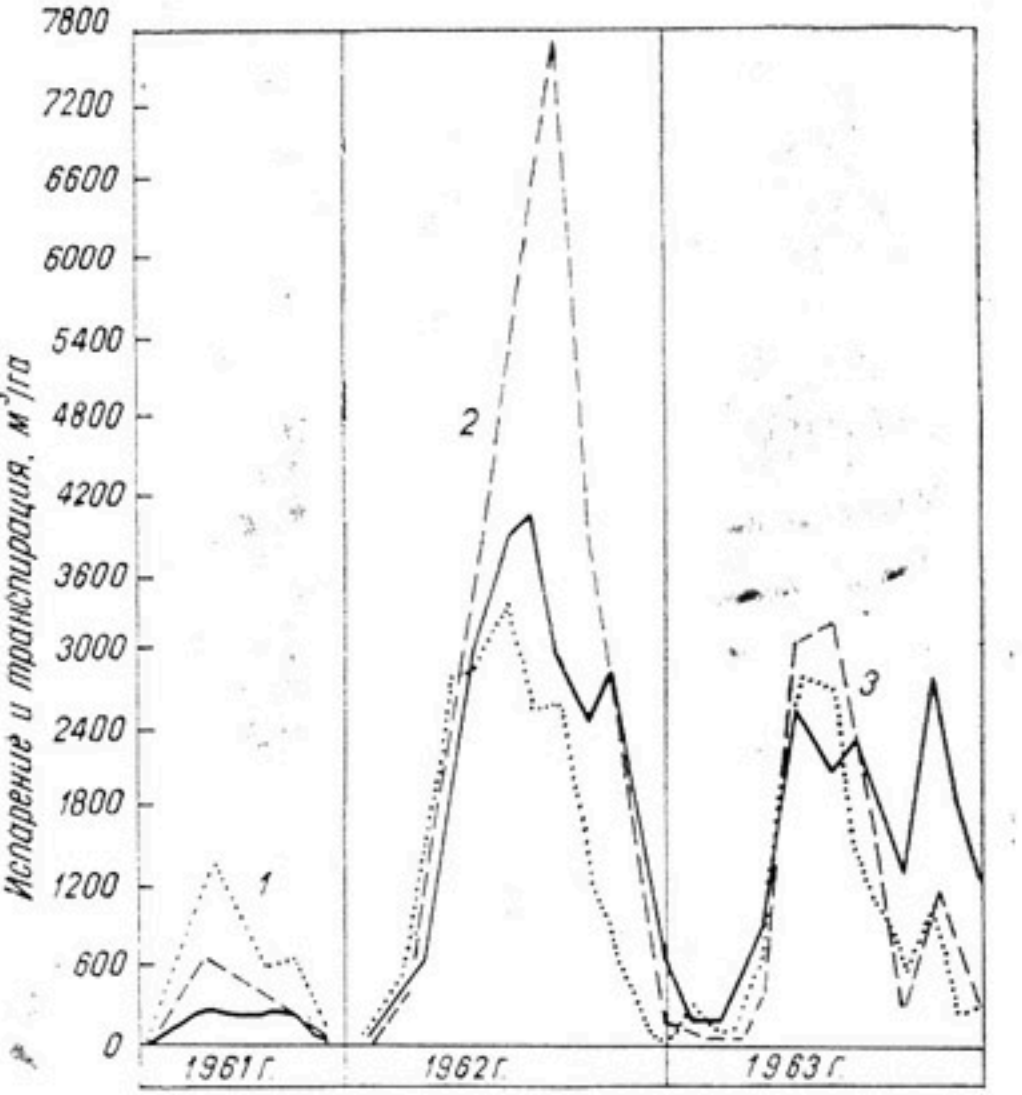

Рис. 5. График испарения и транспирации грунтовых вод люцерной первого (1961), второго (1962) и третьего (1963) годов посева при глубинах уровня воды в лизиметре 1,0 м (1), 1,5 (2), 2,0 (3) от поверхности.

аэрации, затем расходуется на испарение и транспирацию люцерной.

За 1962 г. выпало 283 мм осадков, из которых лишь 53,9 мм просочилось до глубины 1 м, остальная часть израсходована на пополнение запасов влаги зоны аэрации. До глубины 1,5 м просочилось 24,2 мм, 2 м—13,4. В лизиметрах с люцерной третьего года посева инфильтрация осадков увеличивается в 1,5—2,0 раза по сравнению с лизиметрами с люцерной второго года посева.

Инфильтрация поливных вод, как и атмосферных осадков, составляет наибольшую величину и с глубиной уменьшается. В лизиметрах с люцерной второго года посева при оросительной норме

4800 м³/га суммарная инфильтрация при глубине уровня грунтовых вод 1 м равна 280 м³/га. До глубины 1,5—2 м инфильтрация поливных вод не наблюдалась. Поливные воды израсходовались на пополнение запасов влаги зоны аэрации и транспирацию люцерной. На третий год посева инфильтрация поливных вод увеличивается на небольшую величину. При глубине уровня грунтовых вод 1 м инфильтрация поливных вод при оросительной норме 4800 м³/га составила 1237 м³/га, 1,5 м—62 и 2 м—57.

В связи с уменьшением инфильтрации поливных вод и атмосферных осадков суммарное испарение резко возрастает. Наибольшее отмечается при глубине уровня воды 1,5 м. Суммарное испарение (атмосферные осадки, поливные и грунтовые воды) за 1962 г. в лизиметре с уровнем воды 1 м составило 26 465 м³/га, 1,5 м—41 837 и 2 м—33 106. На третий год посева люцерны (1963 г.) суммарное испарение для этих же глубин равно 17 402, 21 692 и 25 481 м³/га.

Между физиологическим развитием люцерны и испарением грунтовых вод существует функциональная связь. По мере развития зеленой массы испарение увеличивается и достигает максимума к моменту укоса. Так, в конце первой половины апреля (третья пятидневка) испарение составило 37,5 м³/га, высота люцерны 60 см. После первого укоса расход на испарение резко снизился и в конце четвертой пятидневки составил 12 м³/га, высота люцерны при этом 5—7 см. После укоса люцерна интенсивно развивалась и к концу мая 1963 г. достигла 93 см. Наряду с этим, повторяя кривую роста люцерны, увеличилась величина испарения, за шестую пятидневку мая она равнялась 90 м³/га. В первой пятидневке июня после второго укоса испарение достигло 20 м³/га, высота люцерны 5 см. Более сглаженное снижение испарения наблюдается при четвертом и пятом укосах. При этом испарение значительно меньше, чем при первом, втором и третьем укосах. Наибольшая высота люцерны и испарение наблюдается в мае, до конца года испарение люцерной и рост ее постепенно уменьшаются.

При глубине уровня воды в лизиметрах 1,5 и 2,0 м влияние укосов люцерны на испарение значительно меньше, чем в лизиметре с глубиной уровня 1,0 м. Величина испарения также значительно меньше (рис. 6).

Если при глубине уровня воды 1,0 высота люцерны к моменту второго укоса (конец мая) равнялась 93 см, то при 1,5 м—85 см и 2,0 м—69 см. С 25—30. V. 1963 г. испарение при глубине 1,0 м составило 90 м³/га, 1,5 м—55 и 2,0 м—54, т. е. с глубиной оно уменьшается.

Следует подчеркнуть, что в лизиметрах с глубиной уровня воды 1,5 и 2,0 м в результате укоса резкого снижения испарения, как при 1,0 м, не наблюдается, а плавно повторяется процесс физиологического развития люцерны. Это положение отмечено в лизиметре с уровнем воды 1,5 м.

После пятого укоса (середина ноября) высота люцерны в лизиметрах 23 (уровень воды 2,0 м) 27 см, 25 (уровень воды 1,5 м)—22 см и 26 (уровень воды 1,0 м)—17,0 см. Следовательно, укос лю-

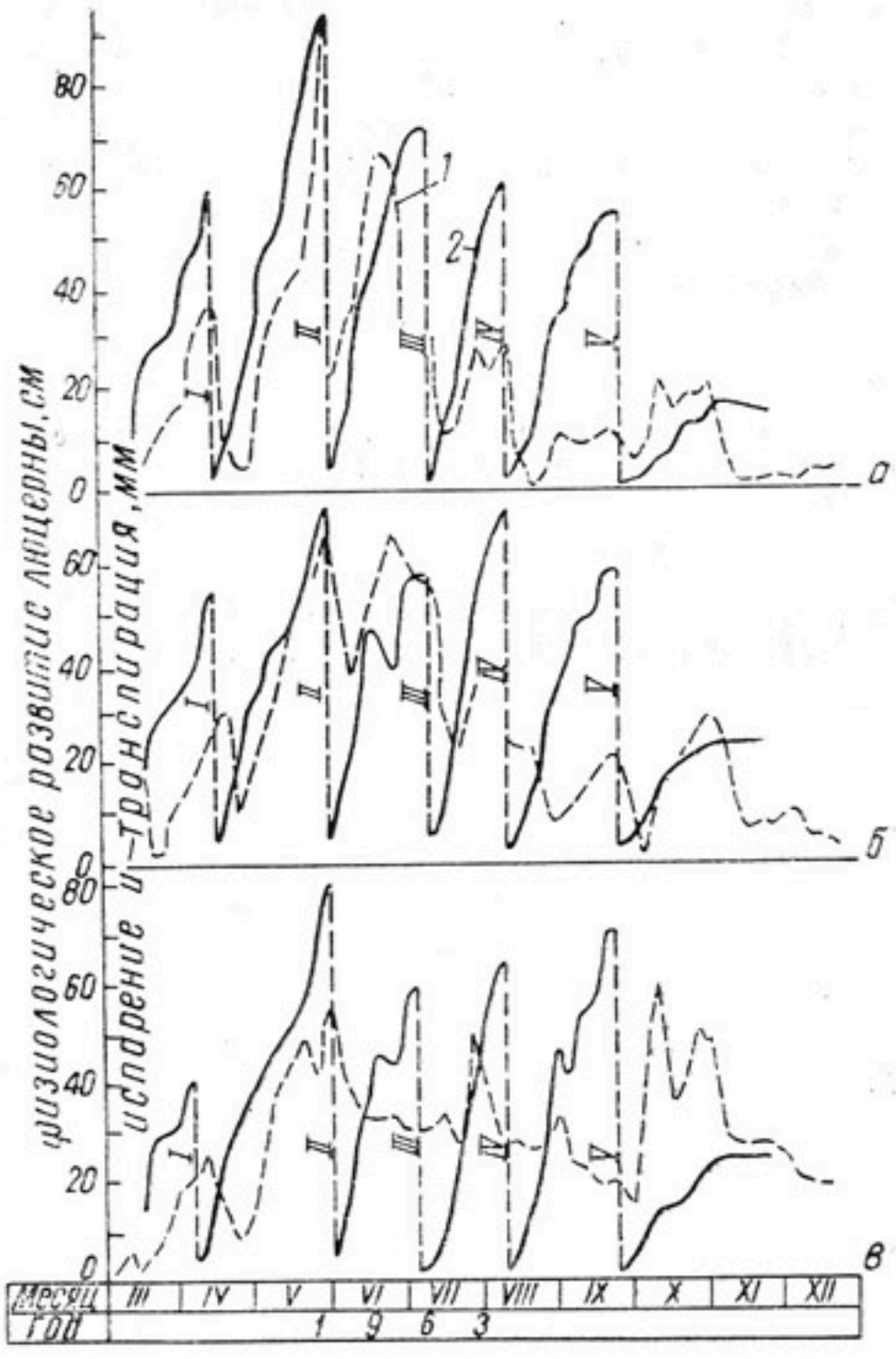

Рис. 6. График испарения и транспирации грунтовых вод в сопоставлении с физиологическим развитием люцерны в лизиметрах опытного участка „Малек" Голодной степи.

Уровень воды в лизиметре, м: *а*—1.0, *б*—1.5, *в*—2,0; *1*—испарение и транспирация, *2*—физиологическое развитие люцерны. Римские цифры на рисунке—укос.

церны значительно снижает расход грунтовых вод на испарение (в отдельные периоды до 5—6 раз). В большинстве случаев, через сутки после укоса, расход грунтовых вод на испарение в два раза меньше, чем до укоса. До четырех дней после укоса сни-

жение испарения характеризуется плавной кривой. На пятый день наблюдается постепенное увеличение испарения. Так, укос люцерны второго года после посева произведен 7. VII. 1962 г. По лизиметру 22 с глубиной уровня 1,0 м величина испарения на второй день укоса снизилась с 264 до 136 м³/га, на 20. VII. испарение грунтовых вод составило 104 м³/га.

Анализ суточных величин испарения показывает, что при глубине уровня воды 2,0 м ночное испарение грунтовых вод часто больше дневного, несмотря на повышенную температуру воздуха. Например, по лизиметру 23 с глубиной до воды 2,0 м с апреля по октябрь величина испарения с 19 до 7 час. составила 7571,3 м³/га,

Таблица 6

Испарение грунтовых вод люцерной третьего года посева за ночные (числитель) и дневные (знаменатель) часы (1963 г.), м³/га

Глубина до воды, м	Месяц												Сумма за 1963 г.	Урожай люцерны на сено, ц/га
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
2,0	1,68	188	562	535	1585	975	1182	9549	745	1594	1736	1218	7571,3	346
				490	1050	1130	1108	834	550	1218			6380,5	
1,5	1,0	48	102	205	660	375	569	480	426	669	711	189	3383	379
				225	545	1345	931	375	306	963			4690	
1,0	2,00	132	397	395	530	290	341	262	280	442	210	300	2540,2	287
				690	2405	2440	1024	487	302	629			7976,7	

с 7 до 19 час.— 6380,5, т. е. на 1190,8 м³/га меньше. При глубине уровня воды 1,5 м (лизиметр 25) дневное испарение на тот же период составило 4690 м³/га, ночное — 3383, при 1,0 м соответственно 7976,7 и 2540,2 м³/га (табл. 6).

В отдельные месяцы в лизиметре с глубиной до воды 1,5 м дневное испарение меньше ночного. Это наблюдалось в мае и августе. Если в мае дневное испарение составило 545 м³/га, то ночное—660. В августе ночное испарение на 105 м³/га больше дневного.

Таким образом, на люцерновых участках при глубине уровня воды более 1,5 м ночное испарение значительно превышает дневное. Это объясняется, как и на хлопковых лизиметрах, интенсивностью восприятия тепла и его проникновения на глубину. Такая же закономерность получена в лизиметрах площадью 2,0 м² с люцерной первого года посева. Опыты проводились в лизиметрах с ненарушенной структурой грунта. Люцерну сеяли в марте 1963 г.

При глубине уровня воды в лизиметре 1,0 и 1,5 м от поверхности земли испарение ночью (с 19 до 7 час) значительно меньше дневного (табл. 6). Если за апрель — октябрь ночное испарение при глубине уровня 1,0 и 1,5 м составляло соответственно

Таблица 7

Интенсивность среднесуточного испарения грунтовых вод люцерной по лизиметрам опытного участка „Малек" Голодной степи, м³/га

Глубина уровня воды, м	Месяц												Среднегодовое	Среднее за V—X
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
Люцерна первого года посева (1961)														
1,0	—	—	—	—	5.1	28,1	46,2	35,5	22,4	24,1	6.6	—	26,9	—
1,5	—	—	—	—	3,1	6.0	24,0	20,9	21.0	—	5,7	—	15,0	—
2,0	—	—	—	—	0,59	6,6	14,6	8,4	9,1	10,3	3,1	—	8,26	—
Люцерна второго года посева (1962)														
1,0	3,0	15,5	53,5	97,0	96,3	115,6	85,6	91.0	44.2	31,3	9,0	1,8	53,6	77,3
1,5	1,5	10,0	36,9	73,0	126	178,0	185,6	176,5	76,2	51.4	11,2	0,5	77,2	132,2
2,0	6,0	13,2	23,0	74.8	97,5	134,0	162,0	97,0	63,3	95,0	59,3	19,8	70,4	108,1
Люцерна третьего года посева (1963)														
1,0	6,4	4,7	12.8	36.0	95.0	91,0	44,4	24,4	19,2	34,8	7,0	7,9	39,5	51,4
1,5	3,2	1,3	32,0	14,3	38,0	57,3	48,3	27,5	24,7	55,8	23,7	6,0	27.6	41,9
2,0	5,4	6,7	18.1	33.8	85,0	70,1	73,9	58,6	43,1	90,7	57,8	39,3	48.5	70,2

2770,1 и 2514,6 м³/га, то дневное—3109,7 и 3032,6 м³/га, т. е. на 339,6 и 518,0 м³/га больше.

В лизиметрах с глубиной уровня воды 2,0 и 3,0 м испарение ночью с апреля по октябрь значительно больше дневного. Максимум испарения наблюдался в сентябре, минимум — в апреле и декабре.

За апрель — октябрь ночное испарение в лизиметрах 43 на глубине уровня воды 2,0 м составило 1252 м³/га, дневное—1000,06, 42 при 3,0 м — соответственно 930,37 м³/га и 659,62 (табл. 6). Заметное увеличение разницы ночного испарения и дневного наблюдается с мая, наибольших величин они достигают в октябре. В это время разница ночного испарения и дневного при глубине уровня воды в лизиметрах 2,0 м равна 99,0 м³/га, 3 м — 127,75, т. е. на 28,75 м³/га больше.

Таким образом, с увеличением глубины залегания уровня воды в лизиметре испарение ночью увеличивается. Суммарное значение ночного и дневного испарения за апрель — декабрь с повышением уровня воды в лизиметре уменьшается. Для глубин уровня воды в лизиметрах 1,0 м, 1,5, 2,0 и 3,0 величина испарения составляет соответственно 6102,09, 6089,89, 2708,4 и 2142,49 м³/га. Интенсивность суточного хода испарения по сезонам года различна и зависит от физиологического развития люцерны. Значительно больше значение суточного испарения у люцерны второго года посева с мощной транспирационной способностью и развитой корневой системой и зеленой массой.

В лизиметрах интенсивность суточного испарения люцерной первого года посева при глубине уровня воды 1,0 м увеличивается с мая и достигает наибольшего значения в июле — августе. Такая же закономерность наблюдается при глубинах уровня воды 1,5 и 2,0 м. Иная картина у люцерны второго года посева: максимум интенсивности суточного испарения на один месяц опережает (наблюдается в июне — июле) люцерну первого года посева. Кроме того, интенсивность суточного испарения в лизиметре с глубиной уровня воды 1,5 м больше, чем в лизиметрах с глубиной 1,0 и 2,0 м. Интенсивность испарения люцерной третьего года посева за май — октябрь при глубине уровня воды в лизиметре 1,0 составляет 51,4 м³/га, при 1,5 м—41,9 и при 2,0 м— 70,2 (табл. 7).

Сезонное и годовое испарение люцерной значительно больше, чем хлопчатником. Эта разница с глубиной залегания уровня грунтовых вод увеличивается. Так, испарение хлопчатником за май—ноябрь 1963 г. при глубине уровня грунтовых вод 1,0, 1,5 и 2,0 м составило соответственно 5294,98, 3724,3 и 3571,3 м³/га, люцерной первого посева за тот же период — 5164,9, 2484 и 1621 м³/га, второго —19 059, 34 991 и 25 244 м³/га, третьего —11 309, 14 236 и 16 163 м³/га.

Кукурузные поля

Опыты по изучению процесса испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод кукурузой проводились в 1965 г. в лизиметрах с нарушенной структурой грунта в испарительном павильоне 4 (четыре лизиметра площадью 3,24 м², размер сторон 1,8×1,8).

Посев кукурузы в лизиметрах и на окружающем поле квадратно-гнездовой (60×60 см). При этом в каждом лизиметре было девять гнезд кукурузы, в каждом гнезде три куста.

По уровню воды лизиметры относятся к искусственно-переменному типу. Инфильтрационные поливные воды из них не выкачивались. Велось наблюдение за скоростью снижения инфильтрационного бугра под влиянием испарения поверхностью почвы и транспирации кукурузой.

В невегетационный период уровень воды в лизиметре поддерживался на глубине 1, 1,5, 2,0 и 3,0 м ниже поверхности. Инфильтрационные воды атмосферных осадков спускались в инфильтрационную трубу открытием вентиля, соединяющего питательную и инфильтрационную трубы. Насосом Комовского вода откачивалась и замерялась объемным способом. Растения в лизиметрах развивались угнетенно в результате естественного засоления земель. Полив кукурузы проводился из расчета 1000 м³/га водой из канала. Частота полива, за исключением лизиметра 69, четыре раза (15. V, 12. VI, 10. VII и 7. VIII). Лизиметр 69 в вегетационный период поливался три раза.

При принятом варианте опыта испарение грунтовых вод с глубиной уменьшалось. Наибольшее испарение наблюдалось при глубине уровня воды в лизиметре 1 м. Испарение за год составило 102,3 м³/га, за вегетационный период —96,5. Осенью и зимой, а также в период вегетационных поливов в связи с созданием экрана влагонасыщения в зоне аэрации инфильтрационными водами испарение с уровня грунтовых вод незначительное. При глубине воды в лизиметре 3 м за январь — апрель испарения не наблюдалось, в ноябре — декабре оно составило 14 м³/га.

При поливах кукурузы уровень воды в лизиметрах резко поднимается. Интенсивность этого подъема с глубиной увеличивается. Промежуток времени расхода инфильтрационного бугра на испарение также увеличивается. Так, 12. VI производился полив кукурузы нормой 1000 м³/га. При этом на один лизиметр подано 320 л воды. В результате инфильтрации поливных вод уровень воды в лизиметрах 69 с глубины 1 м поднялся до 0,75 м, 67— с 2 м до 1,2 м от поверхности. Накопленная ирригационно-грунтовая вода в первом лизиметре израсходовалась на испарение за 5 дней, во втором — за 19. По мере физиологического развития кукурузы уменьшается подъем грунтовых вод, как в хлопковых, так и люцерновых лизиметрах и период сработки ирригационно-грунтовых вод на испарение.

Инфильтрация атмосферных осадков до грунтовых вод с глубиной уменьшается. За 1965 г. при глубине уровня воды 1 м она составила 47,3 мм, 1,5 м—26,69, 2 м—18,7. При глубине уровня 3 м атмосферные осадки не достигали грунтовых вод, а полностью расходовались на пополнение запасов влаги зоны аэрации и испарение. При поливе 7. VIII. подъем грунтовых вод в лизиметре с уровнем 3 м не наблюдался. Но за этот месяц испарение грунтовых вод в лизиметре резко сократилось. В вегетационный период инфильтрация поливных вод при глубине уровня воды в лизиметре 1 м составила 2421 м³/га, 1,5 м—973, 2 м—733, 3 м—984.

Таблица 8

Физиологическое развитие и урожайность кукурузы с початком в лизиметрах (среднее из 9 корней)

Уровень воды в лизиметре, м	Средняя высота куста (см) на				Урожайность, ц/га		
	20. V	20.VI	10.VII	10.VIII	в зеленом состоянии	в сухом состоянии	содержание воды
1	28	86	120	149	276,7	141,9	134,8
1,5	35	143	176	199	447,8	293,4	154,4
2	38	126	151	180	349,2	222,3	125,9
3	14	50	86	137	185,2	108,1	77,1

Увеличение инфильтрации поливных вод в лизиметре с уровнем воды 3 м объясняется слабым развитием растения в этом лизиметре. Испарение грунтовых, ирригационно грунтовых вод и части атмосферных осадков, задержанных зоной аэрации за 1965 г., при глубине уровня воды в лизиметре 1 м равнялось 5629 м³/га, при 1,5 м—4601, при 2 м—3878,4, при 3 м—3596. Инфильтрация до уровня грунтовых вод атмосферных осадков и поливных вод при этих глубинах составлена соответственно 2894, 1239, 1034 и 984 м³/га.

Урожайность кукурузы как по зерну, так и по силосу в лизиметрах оказалась на 40—50% меньше, чем в естественных условиях (табл. 8). Наибольшей урожайностью отличались лизиметры с уровнем воды 1,5 и 2 м. В них наблюдалось сравнительно лучшее физиологическое развитие растений. К концу вегетации высота их составила 180 и 199 см.

Таким образом, при проведении исследований в лизиметрах с искусственно-переменным уровнем можно определить параметры, позволяющие установить сроки и режим поливов сельскохозяйственных культур. Аналогичные опыты, как отмечалось выше, проведены в хлопковых лизиметрах с уровнем воды 1, 1,5, 2 и 3 м. Структура грунта в лизиметрах нарушенная; площадь 2 м², размер сторон 1,41×1,41 м. Испарение грунтовых вод за 1965 г. для этих же глубин составляло 3100, 3379, 1354 и 1217 м³/га, а грунтовых и ирригационно-грунтовых вместе — соответственно

4278, 4763, 2313 и 2275 м³/га, суммарное испарение (атмосферных осадков, поливных и грунтовых вод) — 9794, 9074, 6578 и 6430 м³/га. Оросительная норма 3000 м³/га.

Естественная растительность

Испарение грунтовых вод естественной растительностью изучалось по 14 лизиметрам в испарительном павильоне 4 в течение 1962 г. Из 14 лизиметров 9 заряжались грунтами нарушенной структуры, 5— ненарушенной.

Естественная растительность как в лизиметре, так и на площадке сходна с группой ксерофитов, большинство галофитов (Holophites): камыши, осоки, местами солелюбы. Растения раз-

Таблица 9

Испарение поверхностью почвы и транспирация естественной растительностью грунтовых вод (1962 г.), *м³/га*

Глубина до воды, *м*	Месяц									Сумма
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
1,0	—	105	289	180,6	264,0	431	572	177,6	66,7	2085,9
1,5	—	291	—	190,0	467,0	670	69,2	42,8	—	1730,0
2,0	—	—	—	127,0	339,0	465	173	86,8	—	1190,8

вивались один год, всходили в марте — апреле. Уровень воды в лизиметрах поддерживался на глубине 1, 1,5 и 2 м. Закономерности изменения испарения грунтовых вод естественной растительностью описываются по лизиметрам с ненарушенной структурой грунта и площадью 0,36 и 1 м².

Испарение поверхностью почвы и транспирация естественной растительностью заметно увеличиваются с мая и достигают максимума в сентябре при наибольшей корневой системе растений. Наименьшее испарение наблюдается в ноябре.

В сентябре при глубине залегания уровня грунтовых вод 1,0 м испарение естественной растительностью составляет 572 м³/га, при 1,5 м — 69,2, при 2 м — 173 (табл. 9).

В сентябре — октябре так же, как в лизиметрах с люцерной, испарение при глубине уровня воды 2,0 м увеличивается. Это положение объясняется интенсивным развитием в этот период корневой системы растений. Испарение с апреля по октябрь — ноябрь с глубиной уменьшается. При глубине уровня воды в лизиметре 1,0 м испарение грунтовых вод естественной растительностью составляет 2085,9 м³/га, при 1,5 м — 1730 и 2 м — 1190,8.

Период максимума испарения не совпадает с таковым температуры воздуха. Если максимум температуры в 1962 г. наблю-

дался в июле, то максимум испарения грунтовых вод — в сентябре, т. е. с опозданием на два месяца.

Суточный ход испарения грунтовых вод естественной растительностью, как и люцерной, изменяется в больших пределах, особенно в сентябре при наибольшем развитии корневой системы растений.

По лизиметрам 52, 53, 54 (площадь 0,36 м²) наибольшее суточное испарение наблюдалось в августе—сентябре: при глубине 1,0 м—12—25 м³/га, 1,5 м —15-–30, 2,0 м —11—20.

Оголенная почва

Изучение испарения поверхностью почвы без растительности представляет большой интерес для выявления основных закономерностей формирования испарения и связи его с климатическими факторами.

Испарение обнаженной почвой не имеет практического значения, так как занимаемая ею площадь в пределах орошаемого массива невелика. В основном она охватывает дороги различного типа (шоссейные, благоустроенные и неблагоустроенные и т. д.), дамбы по берегам новостроящихся каналов и т. п.

За величину испарения грунтовых вод обнаженной почвой, как показывает опыт, можно принять испарение хлопчатником, уменьшив ее на 50%.

Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод почвой без растительности исследовались в испарительном павильоне 1. Здесь установлен 21 лизиметр площадью 0,1, 0,36, 1,0, 1,44, 2 м². Из них 11 заряжались грунтами нарушенной структуры и 10— ненарушенной. Участок расположения лизиметров не орошался, ростки растений уничтожались.

Испарение обнаженной почвой заметно увеличивалось с мая и достигало максимума в июне — июле. Кривая испарения повторяла кривую температуры воздуха. Максимум температуры воздуха в 1963 г. наблюдался в июне (26,8°С), испарение при глубине уровня воды 1,0 м составило 310,2 м³/га, т. е. на 41,9 и 65,8 м³/га больше, чем в июле и мае. Коэффициент корреляции испарения грунтовых вод при глубине уровня воды в лизиметре 1 м с температурой воздуха 0,89, температурой почвы 0,90, со скоростью ветра 0,64, дефицитом влажности 0,33.

С увеличением глубины залегания уровня грунтовых вод испарение резко уменьшается (табл. 10). Если испарение за 1963 г. при глубине уровня 1 м составило 1678,8 м³/га, то при 1,5 м — 918,42. При глубине уровня воды 1,5 м, как и при 1,0 м, максимум (170,4 м/³га) испарения наблюдался в июне.

Из годовой величины испарения 70—80% приходится на май—октябрь. В лизиметре при глубине уровня воды 1,0 м испарение за май — октябрь 1963 г. составило 1558,8 м³/га, а при 1,5 м—

Таблица 10

Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод по лизиметрам без растительности за 1963 г., м³/га

Глубина уровня грунтовых вод, м	Месяц												Сумма за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Испарение грунтовых вод													
1,0	30,6	15,5	—	35,6	244,4	310,2	268,1	223,5	304,7	207,9	30,3	7,8	1678,8
1,5	3,75	6,25	—	23,05	79,1	170,4	152,9	136,8	194,6	112,4	27,29	11,88	918,42
Инфильтрация атмосферных осадков													
1,0	60,1	90,2	247,0	218,8	400,8	—	—	—	—	—	71,5	15,95	1104,05
1,5	64,41	152,7	334,7	85,4	426,0	—	—	—	—	—	78,81	162,15	1304,17

Примечание. Площадь лизиметра с уровнем воды 1,0 и 1,5 м—1.44 м². Структура грунта ненарушенная.

Таблица 11

Сумма ночного (числитель) и дневного (знаменатель) испарения грунтовых вод (м³/га) по лизиметрам без растительности

Номер лизиметра	Глубина до воды, м	Площадь лизиметров м²	Месяц												Сумма за апрель—октябрь, м³/га
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
11	1,0	1,0	30,6	15,5	—	16,20	22,06	147,6	121,7	99,6	150,0	100,8	30,3	7,8	757,96
			—	—	—	20,36	123,24	162,6	146,7	123,9	164,7	107,1	—	—	848,40
18	1,5	0,1	—	60	50	5	60	136,6	182,5	153,0	112,0	157,5	128,5	329	806,6
			—	—	—	20	45	83,2	103	77	35	73,5	—	—	433,70
			—	120	—	10	40	60	90	130	130	260	200	220	710
20	2,0	0,1	—	—	—	—	60	40	50	20	20	65,0	—	—	225

Примечание. Структура грунта ненарушенная.

846,3. Среднегодовое значение испарения за 1962—1965 гг. для тех же глубин равно 1898,8 и 1100,7 м³/га.

Испарение грунтовых вод обнаженной почвой значительно (примерно в 2—3 раза) меньше, чем испарение хлопчатником, и в 15 раз меньше, по сравнению с люцерновыми лизиметрами. Из выпавших 298,0 мм осадков в 1963 г. до глубины 1,0 м просочилось 110,4 мм, а до глубины 1,5 м—130,4 мм. Остальная часть расходовалась на пополнение запасов влаги почвогрунтов зоны аэрации и испарение.

Завышенное значение инфильтрации при глубине уровня воды в лизиметре 1,5 м по сравнению со значениями при глубине уровня 1,0 м объясняется выжиманием капиллярных вод из почвогрунтов зоны аэрации при глубине воды 1,5 м и интенсивным испарением влаги с глубиной уровня 1 м.

Величина испарения грунтовых вод в лизиметрах площадью 0,1 м² значительно отличается от величины в лизиметрах площадью 0,36, 1 и 1,44 м². Суммарное испарение за год и месяц в лизиметрах площадью 0,1 м вдвое больше, чем в лизиметрах площадью 1,0 м². Закономерность сезонного и многолетнего испарения тождественна.

По сезонам года при глубине уровня воды в лизиметре 1,0 м испарение грунтовых вод почвой без растительности за ночное время (с 19 до 7 час) меньше, чем за дневное (с 8 до 19 час.). При глубине уровня воды в лизиметре 1,5 и 2,0 м чаоборот (табл. 11). Это положение подтверждают три случая связи грунтовых вод с солнечной энергией, отмеченные для хлопковых лизиметров.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ХЛОПКОВОГО ПОЛЯ

Цель исследований по тепловому балансу — изучение суммарного испарения с хлопкового поля и сравнение полученных данных с данными экспериментальных наблюдений в лизиметрах. Кроме того, эти исследования позволяют осветить особенности микроклимата хлопкового поля и связь его с развитием растений, метеорологическими факторами, режимом грунтовых вод и влажностью зоны аэрации. Рассмотрим режим тех метеорологических факторов, которые входят в расчетную формулу теплового баланса и их связь с суммарным испарением с хлопкового поля.

Экспериментальные исследования по определению элементов теплового баланса проводились в испарительном павильоне 4 в 1965 г. Приборы устанавливались в середине павильона, где хлопчатник развивался сравнительно равномерно. Хлопчатник сорта 108-Ф сеяли 8. IV квадратно-гнездовым способом (60××60 см). Полный всход растений получили через 11 дней после посева. Непосредственно под актинометрическими и градиентными установками поместили пять гнезд хлопчатника с 13 стеблями.

Средняя высота хлопчатника на 30. VII составила 74 см, количество листьев 86, цветков 3, бутонов 29. В вегетацию хлопчатник поливали три раза (14. V, 1. VII и 6. VIII). По состоянию на 31. VIII средняя высота хлопчатника 97 см. Хлопок собирали четыре раза. Последний сбор (курак) произведен 15. XI. Урожайность при пересчете на 1 га площади составила 28,4 ц/га. В конце вегетации стебли растений высушивались и взвешивались, затем сжигались и повторно взвешивались. При этом вес стеблей хлопчатника в сухом виде составил 29,5 ц/га, вес золы растений — 1,9 ц/га. В семи метрах от приборов на площадке 42,46 м² поместили 84 гнезда с 194 кустами хлопчатника. С этого участка собрано 3372 коробочки общим весом 17,614 кг.

Вес сухой массы стеблей равнялся 38,2 ц/га, золы (после обжига) — 2,6 ц/га, урожайность хлопчатника 32,4 ц/га. Как видно, на контрольной площадке хлопчатник развивался лучше, но фенологические показатели и урожайность хлопчатника близки к лизиметрическим.

Суммарная и отраженная радиация увеличивается с февраля, достигая максимума в июне — июле, с августа постепенно уменьшается, минимум наступает в январе — декабре. Так, суммарная радиация 4,21 кал. см²/мин в 1965 г. наблюдалась 23. VI. За этот день отраженная радиация составила 0,82 кал./см²/мин, величина суммарного испарения—24,3 м³/га, что на 68,6 м³/га меньше максимального испарения, отмеченного 8. VIII.

В течение года более плавный ход суммарной радиации наблюдается с мая по сентябрь, в остальной период в связи с изменчивостью метеорологических факторов она динамичная. С 20. V. по 20. VII. суточная суммарная радиация изменялась от 650 до 720 кал/см². С 1. V. по 1. IX. она равнялась 75 907 кал/см².

За рассматриваемое время отраженная радиация составила 16 133 кал/см²; суммарное испарение — 4225,7 м³/га. Изучая суточный режим суммарного испарения, суммарной и отраженной радиации, мы отметим, что функциональной связи между ними нет (рис. 7). Существует общая связь, т. е. по мере повышения радиации увеличивается суммарное испарение. Резкие колебания суммарного испарения, особенно в период вегетации, объясняются изменением уровня грунтовых вод. Коэффициент корреляции суммарного испарения с общей радиацией 0,21, отраженной радиации — 0,72.

Сравнительно лучшая корреляционная связь суммарного испарения наблюдалась с радиационным балансом 0,85. Максимум альбедо деятельной поверхности наблюдался в августе (24%) при суммарном испарении 1435,7 м³/га. За вегетационный период альбедо поверхности составило в среднем 20%. Оно увеличивается в связи с равномерным покрытием ее листьями и густым развитием кустов хлопчатника. В феврале, когда участок покрылся снегом, альбедо поверхности составляло 31%. В течение года на хлопковом поле альбедо начинает увеличиваться с мая, достигая макси-

мума в августе, наименьшее (13%) значение наблюдается в ноябре.

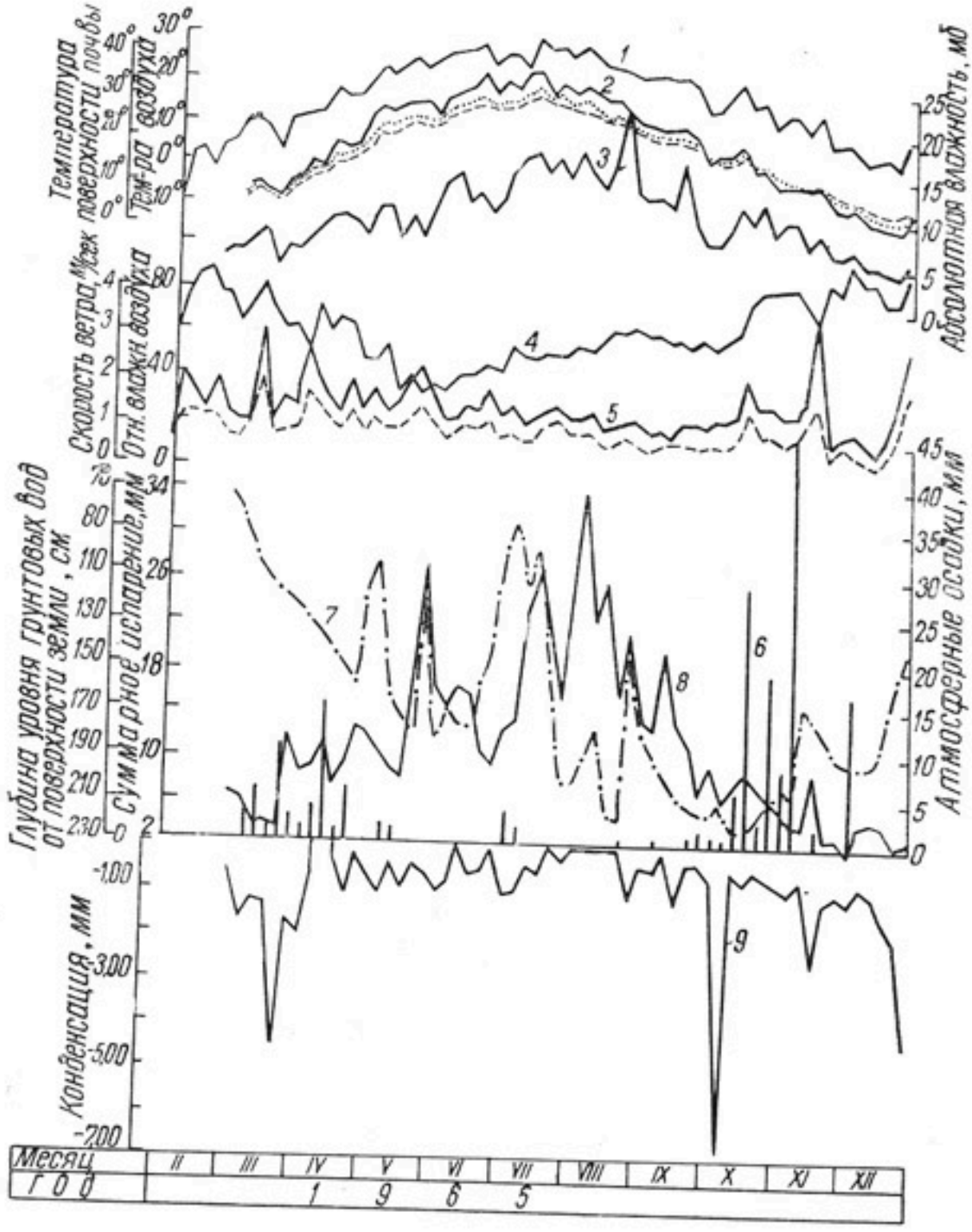

Рис. 7. Совмещенный график пентадных суммарных испарений и метеорологических факторов на участке теплового баланса хлопкового поля опытного участка „Малек".

1—температура воздуха, *2*—температура поверхности почвы на глубинах 0,0 и 0,20 м, *3*—абсолютная влажность воздуха, *4*—относительная влажность воздуха, *5*—скорость ветра на высотах 0.5 и 2.0 м, *6*—атмосферные осадки, *7*—уровень грунтовых вод, *8*—суммарное испарение, *9*—конденсация.

В течение дня в августе наибольшая суммарная и отраженная радиация наблюдается с 11 до 15 час., максимум — с 12 до 13 час. (табл. 12). Суммарное испарение увеличивается с 12 час.

За 11. VIII оно достигло 4,8 мм, 12. VIII—5,03, 13. VIII—4,92, 14. VIII—5,62 и 15. VIII—4,31 мм.

Длинноволновой радиационный баланс, представляющий разность между приходом длинноволновой радиации атмосферы и излучением Земли, за период наблюдений отрицательный. Это объясняется тем, что приток длинноволновой радиации составляет небольшую величину. Поэтому баланс длинноволновой радиации называется «эффективным излучением Земли», которое из-

Таблица 12

Динамика суммарной и отраженной радиации на хлопковом поле

Август 1965 г.	Сроки наблюдения (местное среднесолнечное время), час.					Сумма	Среднее	Сумма за день
	6	9	12	15	18			
Суммарная радиация, кал/см²/мин								
11	0,13	0,92	1,31	0,99	0,21	3,56	0,71	601
12	0,14	0,97	1,31	0,99	0,18	3,59	0,72	601
13	0,15	0,91	1,29	0,98	0,19	3,52	0,70	584
14	0,17	0,93	1,30	0,98	0,21	3,59	0,72	588
15	0,12	0,94	1,28	0,97	0,18	3,49	0,70	580
Отраженная радиация, кал/см²/мин								
11	0,05	0,21	0,27	0,21	0,07	0,87	0,16	140
12	0,05	0,22	0,27	0,21	0,04	0,79	0,16	140
13	0,05	0,21	0,28	0,22	0,07	0,83	0,17	139
14	0,06	0,21	0,26	0,21	0,06	0,80	0,16	139
15	0,04	0,20	0,25	0,21	0,05	0,75	0,15	124
Суммарное испарение, мм								
11	—	0,90	1,65	1,56	0,42	4,53	—	—
12	—	1,20	1,89	1,26	0,57	4,92	—	—
13	—	1,20	1,86	1,57	0,27	4,90	—	—
14	—	1,02	2,34	1,43	0,31	5,5	—	—
15	—	1,05	1,58	1,41	0,23	4,27	—	—

меняется незначительно. Максимум отмечается в июне — июле. В зимний, весенний и осенний периоды баланс длинноволновой радиации уменьшается в связи с пасмурной погодой и облачностью. При этом встречное длинноволновое излучение атмосферы увеличивается за счет скрытой теплоты при образовании облачности.

Сравнивая суммы месячных испарений и среднемесячных температур воздуха, заметим, что температура воздуха характеризуется плавной кривой с максимумом в июле, к зиме она постепенно уменьшается. Кривая суммарного испарения отличается от кривой температуры воздуха резкими колебаниями, не соответ-

ствующими подъемам и спадам температуры воздуха. С февраля по май наблюдается плавное увеличение суммарного испарения.

С середины июня кривая испарения резко возрастает, достигая максимума в августе. Основной фактор формирования испарения — температура воздуха, поэтому коэффициент корреляции испарения и температуры воздуха высокий (0,87). Коэффициент корреляции между суммарным испарением и абсолютной влажностью воздуха подобен температуре воздуха. Но тесной связи не наблюдается, так как коэффициент корреляции составляет 0,66.

На испарение с деятельной поверхности существенно влияет скорость ветра и градиент влажности воздуха. Эти параметры непосредственно входят в расчетную схему теплового баланса.

С февраля по апрель среднемесячные градиенты влажности воздуха положительные и незначительны по абсолютной величине. Увеличиваются они в мае в связи с повышением температуры воздуха и поверхности почвы. Это способствует накоплению влаги в пахотном слое в зимне-весенний период и вегетационный полив хлопчатника 14. V.

Резкое увеличение влажности в мае соответствует максимуму испарения. В июне градиент влажности падает, в связи с чем уменьшается суммарное испарение.

Градиент ветра между выбранными точками наблюдений 0,5 и 2,0 м от поверхности в течение года плавно изменяется. График градиента ветра в весенний и осенне-зимний периоды имеет выпуклый вид, летом — вогнутый (рис. 7).

Скорость ветра неустойчивая, на графике она характеризуется ломаной кривой. Летом скорость ветра выше, чем в зимний и осенне-весенний периоды. В связи с этим влияние скорости ветра на суммарное испарение с хлопковых полей летом менее интенсивное, чем в остальные периоды. Коэффициент корреляции суммарного испарения и скорости ветра составляет 0,51.

Наблюдается тесная корреляционная связь между суммарным испарением и режимом уровня грунтовых вод. При повышении уровня суммарное испарение увеличивается, при понижении — уменьшается (за исключением августа) (рис. 7). Коэффициент корреляции 0,76. На участке теплового баланса в мае уровень грунтовых вод приближается к поверхности два раза (в начале и конце месяца). За это время суммарное испарение увеличилось. В середине июля уровень грунтовых вод с глубины 1,82 м поднялся до 0,81 м от поверхности. Суммарное испарение увеличивалось с 12,4 мм в начале месяца до 26,3 мм в середине. В конце июля грунтовые воды понизились до глубины 1,97 м, а суммарное испарение — до 16,1 мм. В августе в связи с максимальным развитием наземной массы и корневых систем хлопчатника суммарное испарение составило 143,57 мм. Поэтому в августе уровень грунтовых вод в орошаемых районах интенсивно снижается и имеет наибольшую глубину за вегетационный период. В зимний и осенне-весенний периоды связи суммарного испарения с уровнем грун-

товых вод не наблюдается, так как величины испарения незначительны и интенсивность его влияния на грунтовые воды ослаблена. Коэффициент корреляции суммарного испарения с уровнем грунтовых вод в зимний и осенне-весенний периоды составляет 0,37, летний —0,92; с марта по декабрь —0,76.

Величины испарения, полученные в лизиметрах и методом теплового баланса, в основном совпадают. За вегетационный период суммарное испарение по тепловому балансу равно 500,93 мм при средней глубине уровня грунтовых вод 1,57 м, по репрезентативному лизиметру 63 с уровнем воды 1,5 м— 574,8 мм. Разницу между этими данными (73,87 мм) можно отнести к подземному стоку. Кроме того, она получена в результате бóльшего испарения грунтовых вод в лизиметре в вегетацию с глубины 1,5 м, тогда как на участке теплового баланса в мае, августе, сентябре и октябре грунтовые воды залегали ниже 1,5 м (табл. 13).

Днем суммарное испарение значительно больше, чем ночью. В процентном отношении ночное суммарное испарение за 10 мес. составляет 8,6% от дневного. Максимум ночного испарения наблюдается в мае — октябре (8,11 и 9,74 мм), в марте, апреле, июне, ноябре оно уменьшается соответственно до 6,87, 6,51, 5,33 и 6,12 мм. В июле, августе, сентябре и декабре ночное суммарное испарение не превышает 1,5—3% от дневного и равно 3,42, 3,86, 3,16, 1,6 мм. Суммарное ночное и дневное испарение за март — декабрь 1965 г. было 54,72 и 538,83 мм.

Конденсация водяных паров на хлопковых массивах наблюдалась в осенне-зимний и весенний периоды. За вегетационный период конденсация происходила только ночью. Основной источник конденсации — влага, которая расходуется на испарение с поверхности почвы. Днем прогревшийся водяной пар поднимается вверх по закону конвективного обмена, ночью в связи с понижением температуры воздуха, двигаясь вниз, водяной пар осаждается на деятельной поверхности в капельно-жидком виде. С марта по декабрь величина конденсации составила 88,22 мм, за вегетационный период — 26,57 мм.

Конденсационная влага не питает грунтовые воды, особенно в вегетацию, а косвенно влияет на их испарение, увлажняя верхние слои почвы.

Следует отметить, что данные по испарению, определяемые методом теплового баланса, характерны для исследуемой площади с определенной динамикой грунтовых вод. Это объясняется тесной коррелятивной связью испарения с их режимом. Поэтому необходимо проведение одновременных опытов по тепловому балансу на нескольких участках для определения зависимости испарения от глубины залегания грунтовых вод. Кроме того, тепловой баланс не позволяет установить инфильтрационное питание грунтовых вод, параметры их режима, зависимость урожайности культур от глубины залегания и минерализации грунтовых вод и др., в связи с чем для балансовых исследований более целесообразно применять лизиметры.

Таблица 13

Параметры теплового баланса и суммарное испарение на хлопковом поле

Метеоэлемент	Месяц											За вегетационный период		
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	сумма	среднее	сумма
Атмосферные осадки, мм	42,8	25,4	26,4	3,2	0.0	4,4	0.6	2.5	49,1	45.5	14,9	59,8	—	214,8
Температура воздуха, °С	−0.2	7,6	15,3	22,5	25,4	26.4	22,2	17,6	13.2	7,9	1.8	—	21.2	—
Скорость ветра, м/сек	1,0	0,9	1,2	1,0	0,9	0,8	0.6	0,5	0,8	0,8	0,7	—	0,8	—
Температура поверхности почвы, °С	-	9.0	18,8	27,9	32,8	33.4	29,4	21,9	15,7	7,9	2,2	—	26,9	—
Влажность почвы, %	—	17,2	17,5	13.9	11,5	15,7	14,4	14.6	19,2	18.5	25,6	—	14,9	—
Радиационный баланс, кал.см/²/мин	0.05	0,08	0,13	0,20	0,21	0,22	0,21	0,14	0.08	0,04	0.02	—	0,18	—
Длинноволновый радиационный баланс, кал.см/²/мин	0.08	−0,1	−0.12	0,15	—0,18	−0,13	—0.12	−0.12	—1,08	−0,09	—0,08	—	0,13	—
Альбедо деятельной поверхности, %	31	22	19	20	20	21	24	20	16	13	15	—	20	—
Суммарная радиация, кал/см²/мес.	8112	11987	13597	18400	20735	19357	17251	11900	10918	6241	5298	98725	16454	141371
Отраженная радиация, кал. см²/мес.	2272	2885	2541	3670	3931	3767	3778	2511	1886	880	779	19543	3254	28645
Суммарное испарение, мм	—	37,32	57.99	82,90	82,79	113.31	1 '3,57	78.11	47.25	29.91	20,40	550.93	—	693.55
Конденсация водяных паров, мм	—	12.0	4,39	5,16	3.06	3.52	1.56	—3,03	10.34	7,34	11.15	26,57	—	88,22
Рост хлопчатника, см	—	—	—	10	26	74	97	98	98	—	—	—	—	—
Глубина залегания уровня грунтовых вод от поверхности, см	—	99	139	120	166	121	192	205	215	185	175	—	157	—

ВОДНЫЙ БАЛАНС РИСОВЫХ ПОЛЕЙ

Для изучения элементов баланса грунтовых вод рисовых полей Голодностепской гидрогеологической станцией в 1970—1971 гг. проводились экспериментальные исследования на опытном участке в совхозе «Сырдарьинский», расположенном на третьей надпойменной террасе р. Сырдарьи, в 8 км юго-восточнее пос. Сырдарья. Водосодержащие породы представлены с поверхности супесями мощностью 0,5—0,8 м, подстилаемыми крупнозернистыми песками с включением гравия. Грунтовые воды, приуроченные к этим отложениям, залегают на глубине 1,2—3,0 м с минерализацией 1,1—1,4 г/л. По типу относятся к сульфатно-натриево-магниево-кальциевым.

Река Сырдарья, протекающая на востоке на расстоянии 650 м от опытного участка, является дреной, в связи с чем грунтовые воды имеют уклон к реке.

Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод изучались одновременно лизиметрическим, гидрометрическим и теплобалансовым методами. Для реализации первого метода установлено семь лизиметров площадью 1,44 м² конструкции М. С. Алимова. Из них лизиметр 6 высотой 1 м имел открытое дно. Он предназначен для исследования скорости фильтрации поливной воды в грунтовый поток. Лизиметром 4 высотой 1 м изучалось испарение с водной поверхности. В остальных лизиметрах 1—3, 5, 7 проводилось экспериментальное исследование испарения воды с рисовых чеков. В лизиметрах 1—3 и 7 наблюдали за испарением грунтовых вод после прекращения водоподачи на рисовое поле с 28. IX. 1970 г. Уровень воды в них поддерживался на глубине 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 м от поверхности.

В каждом лизиметре устанавливались измерительные рейки, при помощи которых определялся расход влаги на испарение между двумя промежутками времени. Толщина слоя воды на поверхности лизиметра 10 см. Воду доливали утром, в полдень и вечером.

Гидрометрическим методом определяли водный баланс рисового чека площадью 214 м². На рисовом чеке устанавливалось два водослива, по первому определялось поступление поверхностной воды, по второму — сброс воды. Орошение рисового чека осуществлялось методом постоянного затопления. На опытном и двух соседних рисовых полях устанавливались приборы для изучения теплового баланса (рис. 8). Проводились актинометрические и градиентные наблюдения (8 раз в сутки) через каждые три часа по среднесолнечному времени по инструкции ГУГМС. С такой же частотой проводились наблюдения по водосливам.

До наблюдений за испарением на совхозном рисовом поле и одновременно на опытном участке проведена зяблевая вспашка, а весной перед посевом — предпосевная культивация с одновременным боронованием и разделкой чеков. 12 мая замочены семена риса, а 16 участок был затоплен водой, посеян рис из

расчета 200—210 кг/га. Приводим фазы развития риса: всходы с 15. VI по 19. VI, кущение с 10. VII по 16. VII, выход в трубку с 11. VII по 25. VII, колошение и налив 26. VII—17. VIII, молочная спелость 18—27. VIII, восковая спелость с 28. VIII по 5. IX, полная спелость с 6 по 15. IX.

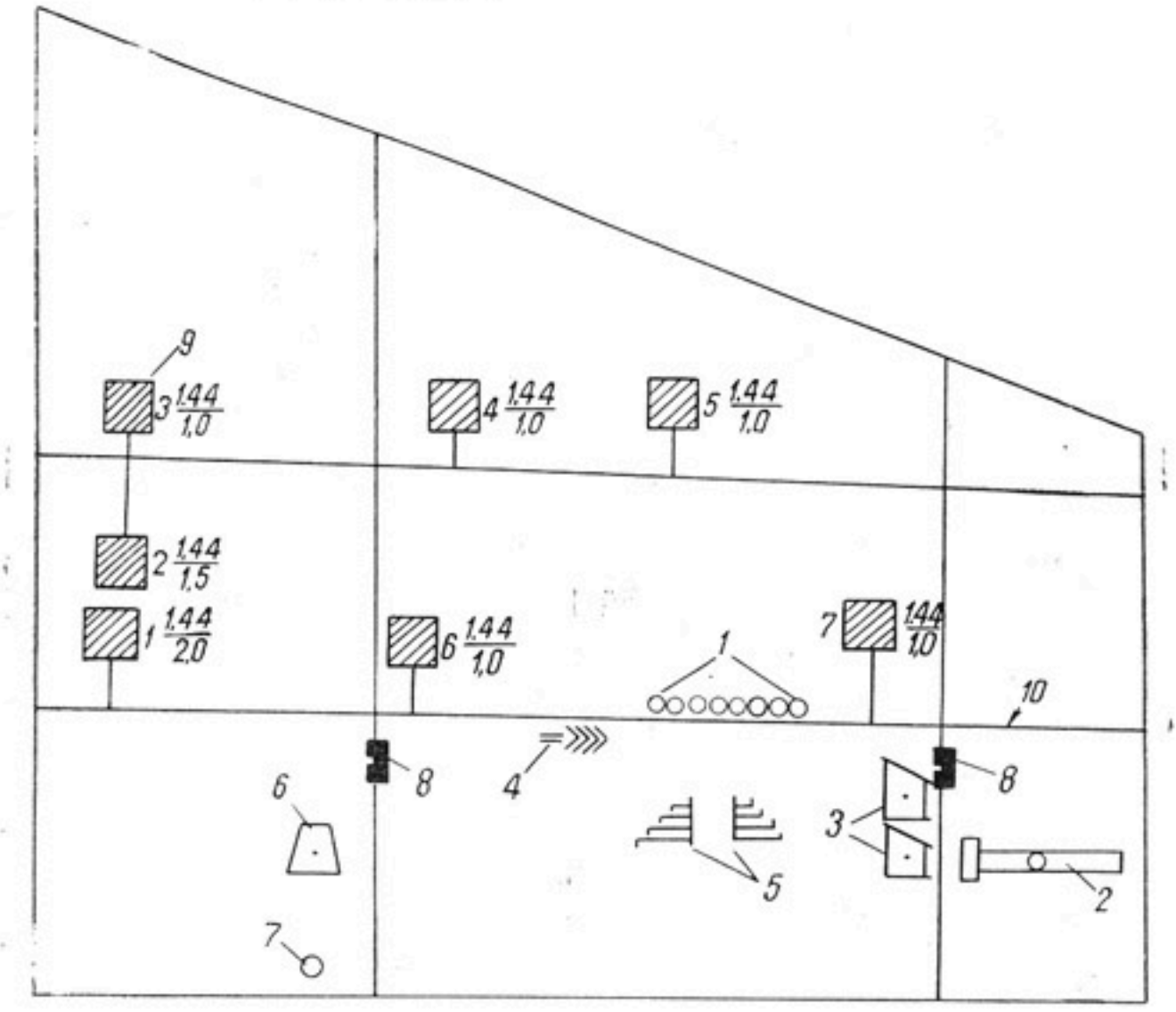

Рис. 8. План размещения приборов на опытном участке „Сырдарья".

1—вытяжные термометры, *2*—стойка для актинометрических приборов, *3*—психрометрические будки, *4*—термометры Савинова, *5*—градиентные стойки для наблюдений, *6*—осадкомер Третьякова, *7*—наблюдательная скважина, *8*—водосливы, *9*—лизиметры, *10*—границы чеков.

Водопотребление риса определялось по формуле

$$E = 0{,}65\,\Sigma d,$$

где E — потребность в воде за период вегетации риса, мм;

0,65 — средний за вегетацию биологический коэффициент испарения;

Σd — сумма среднесуточных дефицитов влажности за вегетацию, мм.

Суммарное водопотребление риса за вегетацию (1970 г.) составило 8402 м³/га, сумма полезных температур за вегетацию риса — 3516°, урожай — 85 ц/га, затраты воды на 1 ц/м³ — 392.

Состояние риса за вегетационный период на фоне и в лизиметрах одинаковое. За вегетацию риса удобрение вносилось из расчета 6,0 ц/га суперфосфата и 3,0 ц/га селитры. В фазу выхода в трубку рисовые поля и опытный участок обрабатывались с самолета гербицидами. Там, где оставались сорняки «просянка», прополка производилась вручную. К концу вегетации высота риса

Таблица 14

Сводная таблица параметров теплового и водного балансов за вегетационный период 1970 г.

Показатель	Месяц					Сумма за вегетационный период	Среднее за вегетационный период
	V	VI	VII	VIII	IX		
Суммарное испарение по тепловому балансу, мм	151,47	195,19	215,29	142,34	68,45	772,74	—
Испарение с водной поверхности, мм	72,82	281,93	156,08	87,28	65,93	664,04	—
Суммарное испарение по лизиметрам, мм	60,07	233,78	248,77	258,11	113,24	913,97	—
Транспирация рисом, мм	—	—	112,30	189,37	92,78	394,45	—
Температура воздуха, град.	22,3	24,9	25,5	23,9	18,2	—	23,0
Температура почвогрунтов на глубине 0,40 м, град.	19,5	24,8	25,5	24,6	20,2	—	22,9
Дефицит влажности воздуха, мб	15,60	18,0	14,1	12,0	10,4	—	14,0
Скорость ветра, м/сек	1,9	1,4	0,9	0,6	0,6	—	1,1
Осадки, мм	18,5					18,5	
Средняя высота риса в лизиметрах, см	5	41	84	108	109	109	
Высота риса на общем фоне, см	8	17	62	100	110	110	

достигла 110 см. Урожай составил с фона 85 ц/га, с лизиметров — в среднем 94 ц/га. Уборка урожая проводилась с 28. IX по 4. X 1970 г.

Результаты исследований по изучению испарения с рисового участка лизиметрическим способом и методом теплового баланса приведены в табл. 14. Анализируя ход суммарного испарения, наблюдаем подобие кривых в вегетационный период (рис. 9). При суммарном испарении по тепловому балансу результаты занижены по сравнению с лизиметрическими данными по количественным показаниям, а по ходу сезонного изменения они близки к испарению с водной поверхности. Максимальные величины суммарного испарения отмечены в фазу колошения и налива зерна в конце июля и начале августа. В начале сева риса до середины июля, пока высота и кустистость незначительны, суммарное испарение по тепловому балансу мало отличалось от суммарного испарения по лизиметрическому методу. С развитием риса

при увеличении затенения водной поверхности под пологом суммарное испарение по тепловому балансу стало заметно понижаться, хотя ход его остается аналогичным ходу испарения с водной

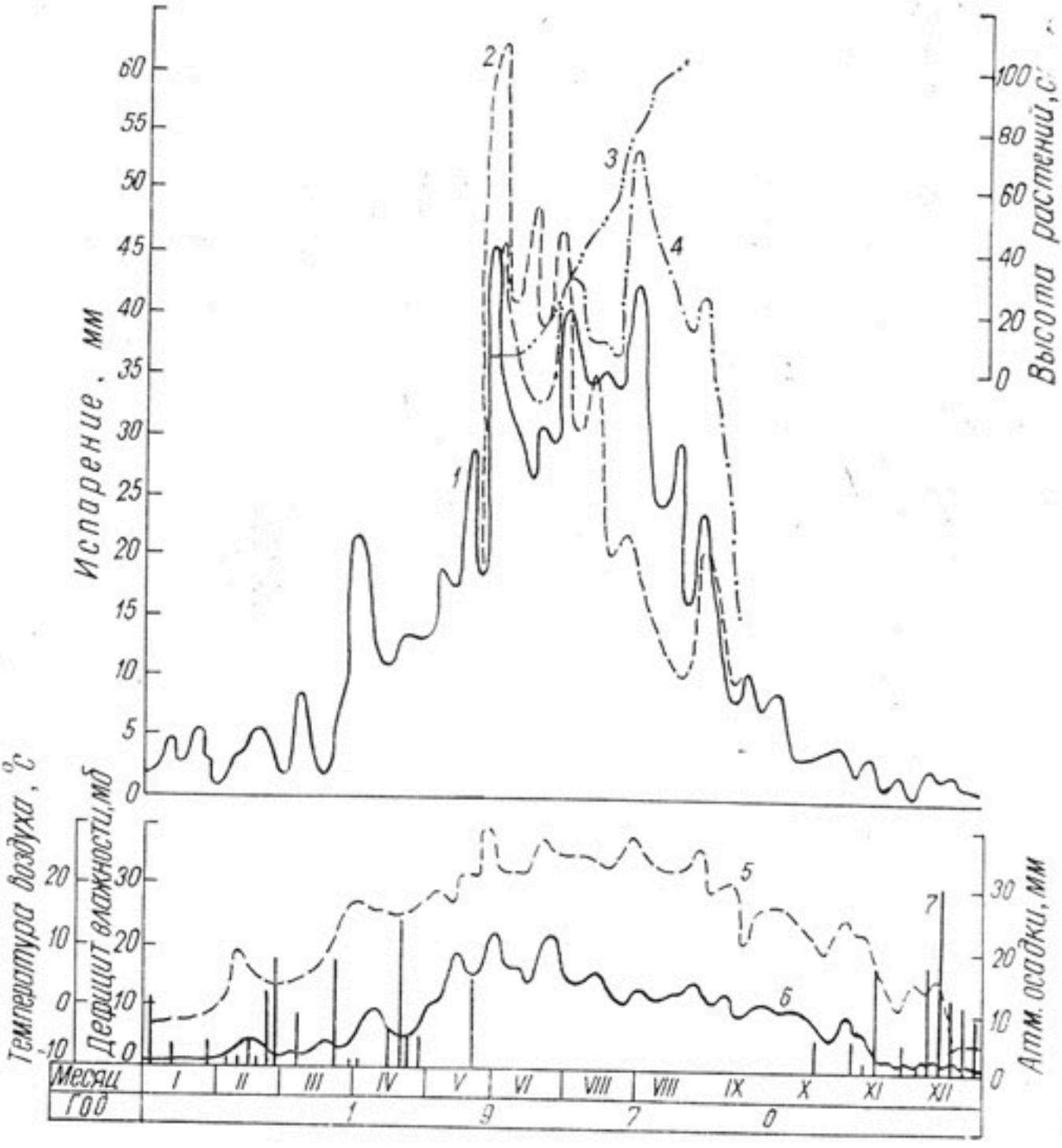

Рис. 9. График суммарного испарения с рисового поля.

1—суммарное испарение по лизиметрам, *2*—суммарное испарение по тепловому балансу, *3*—испарение с водной поверхности, *4*—высота риса, *5*—температура воздуха, *6*—дефицит влажности, *7*—атмосферные осадки.

поверхности и суммарному испарению по лизиметрическому методу. Основная причина понижения испарения — затененность в период массового кущения риса. Кроме того, постоянный приток свежей воды на поле препятствует прогреванию воды.

На затопленном поле под рисовым пологом создаются умеренные микроклиматические условия. Температура воздуха и дефицит

влажности имеют сглаженный ход в течение вегетационного периода, этим объясняются заниженные показатели по сравнению с данными на открытой поверхности по ГМС «Сырдарья». Скорость ветра незначительная (от 0 до 1 м/сек). Очевидно, указанные условия приводят к уменьшению суммарного испарения по тепловому балансу в период наибольшей высоты и густоты стояния риса.

За вегетационный период суммарное испарение по тепловому балансу на рисовом поле мало отличается от суммарного испарения на хлопковых и люцерновых полях. Наиболее достоверной следует считать величину суммарного испарения, полученную лизиметрическим методом, которая за период вегетации составила 9140 м³/га. В суммарное испарение входит транспирация рисом (3940 м³/га, или 43,1% общей величины).

Кривая суммарного испарения по лизиметрическому методу в начале вегетации занимает среднее положение среди двух других кривых. Испарение с водной поверхности в это время высокое. К концу июня, когда высота риса достигает 41 см и увеличивается затенение, положение кривых изменяется. Так, суммарное испарение по лизиметрическому методу занимает самое высокое положение, это объясняется наибольшей транспирацией рисом. Испарение с водной поверхности в период наибольшей зеленой массы минимальное — результат большой затененности водной поверхности, в это время оно в 2—3 раза меньше суммарного испарения.

Наблюдается прямая зависимость суммарного испарения с водной поверхности от температуры и дефицита влажности воздуха, при максимальной высоте риса наоборот.

Приводим водный баланс рисового чека за вегетационный период 1970 г.:

Приходные статьи	*м³*	%
Подача оросительной воды	33 229	99,44
Запас влаги в зоне аэрации к моменту затопления рисового чека	185	0,55
Атмосферные осадки	4	0,01
Итого	33 418	100
Расходные статьи		
Сброс оросительной воды	27 235	81,5
Суммарное испарение	196	0,6
Запас влаги в зоне аэрации	265	0,8
Расход воды на фильтрацию	5722	17,1
Итого	33 418	100

Гидрометрическими наблюдениями установлено, что за период вегетации риса на опытный чек подано 33 229 м³ оросительной воды. Из этой воды сброс на соседний чек составил 27 235 м³. Потери на фильтрацию в грунтовый поток, вычисленные на основании данных лизиметра 6 с открытым дном, 5722 м³. На конец

вегетации содержание влаги в зоне аэрации 265 м³. Испарение и транспирация с поверхности рисового чека составляли 196 м³, или 8100 м³/га.

Таким образом, суммарное испарение с рисовых полей в условиях аридной зоны равно 8000—9000 м³/га. Величины суммарного испарения, полученные лизиметрическим, гидрометрическим и теплобалансовым методами, близки и составили соответственно 9139,7, 8100, 7727,4 м³/га. Среднее их значение 8322 м³/га. Для изучения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод на рисовых плантациях рекомендуется применение лизиметрического метода, так как он позволяет определить помимо суммарного испарения оросительной воды испарение грунтовых вод до и после пуска воды в рисовое поле, инфильтрацию атмосферных осадков.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАГИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ НА ИСПАРЕНИЕ И ИНФИЛЬТРАЦИОННОЕ ПИТАНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Содержание влаги в почве, как правило, постепенно изменяется и зависит от глубины залегания уровня грунтовых вод, механического состава пород зоны аэрации, интенсивности просачивания атмосферных осадков. На орошаемых массивах, кроме этого, резкое изменение влажности происходит под влиянием вегетационных поливов и промывок. Испарение во всех случаях приводит к резкому сокращению и перераспределению влаги в вертикальном разрезе зоны аэрации.

Мы определяли связь испарения с содержанием влаги в зоне аэрации под различными сельскохозяйственными культурами и почвой без растительности. Опыты проводились в лизиметрах при глубине уровня воды 1,0, 1,5, и 2,0 м. Исследования велись для выяснения распределения влаги в зоне аэрации на участках с хлопчатником, кукурузой и почвой без растительности, динамики содержания ее за расчетный период под влиянием вегетационных поливов и испарения, зависимости содержания влаги в зоне аэрации от глубины залегания уровня грунтовых вод.

Пробы отбирались в конце весны и осени. Литологическое строение зоны аэрации в лизиметрах однообразное — она представлена средними суглинками, изрезанными корнями растений.

По механическому составу более тяжелыми являются почвогрунты лизиметров без растительности, обогащенные солями в виде конкреций и жилок. В верхнем слое солей содержится до 4,25% объема породы.

Источник влаги для растений — зона аэрации. Влага в зоне аэрации может содержаться в виде пара, поступающего в той или иной степени в поры грунта, прочно связанной пленочно-молекулярной (сорбированной), рыхло связанной — пленочно-молекулярной (сорбированной), гравитационной — капиллярной свободно просочившейся жидкой, твердой — в виде льда (Лебедев, 1963).

По вертикали содержание влаги соответствует следующим категориям, по А. А. Роде (1960): полная влагоемкость (ПВ), интервал между наименьшей и полной влагоемкостью (ПВ—НВ), наименьшая влагоемкость (НВ), интервал от наименьшей влагоемкости до влажности завядания (НВ—ВЗ), не выше влажности завядания (ВЗ). Выделенная категория влажности характерна для одного ряда определения или для того ряда, в котором не отмечается резкого изменения содержания влаги в зоне аэрации под влиянием естественных и искусственных факторов. Часто одни виды влаги переходят в другие, при этом может резко измениться граница категорий влажности.

В лизиметрах содержание влаги в зоне аэрации с глубиной увеличивается. Отклонение наблюдается в течение 3—5 дней после вегетационных поливов и выпадения атмосферных осадков. В конце межполивного периода влажность корнеобитаемого слоя хлопковых лизиметров соответствует четвертой категории влажности, по А. А. Роде. После полива, благодаря просачиванию, влажность корнеобитаемого слоя и ниже приближается ко второй категории, затем под влиянием испарения и транспирации переходит в третью и четвертую. Наиболее стабильное содержание влаги в зоне аэрации наблюдается во время отсутствия инфильтрационного питания грунтовых вод.

Наиболее благоприятное содержание влаги для нормального развития хлопчатника отмечено в лизиметрах с уровнем воды 1,5 м. С глубины 0,10 до 1,5 м содержание влаги до и после вегетации сравнительно постоянное. Наибольшая концентрация влаги отмечается с глубины 0,6 м, выше мы относим ее к зоне периодического (капиллярное и инфильтрационное) увлажнения. В лизиметре с уровнем воды 1,0 м с 4. VI по 24. XI с глубины 0,10 м запас влаги уменьшился.

Наибольшее уменьшение отмечается на глубине 0,4 м, т. е. в нижней части пахотного слоя. Среднее сокращение содержания влаги в лизиметре 64 составляло 2,44%. С 4. VI по 24. XI лизиметр поливался четыре раза, оросительная норма 4400 м³/га. Поливы проводились в июне (1200 м³/га), августе (1200 м³/га) и сентябре (1200 м³/га). Из 4400 м³/га воды до уровня грунтовых вод просочилось 3769. Остальная вода задерживалась зоной аэрации, затем расходовалась на испарение и транспирацию. За июнь — сентябрь наряду с оросительной водой на испарение израсходовано 3115 м³/га грунтовой воды. Суммарное испарение составляет 6904 м³/га. Несмотря на большой приход влаги к корнеобитаемому слою к концу расчетного периода отмечена недостача ее в метровом слое лизиметра на 2,44%, т. е. почвогрунты зоны аэрации по сравнению с дополивным периодом на 24. XI (за исключением верхнего пахотного слоя) иссушились. В верхнем слое (40 см), наоборот, наблюдается переувлажнение почвы на 7,05% за счет инфильтрации атмосферной влаги (31 м³/га), выпавшей на один день раньше отбора образцов.

Подобное иссушение зоны аэрации наблюдалось по лизиметру 65 с уровнем воды 2,0 м. Величина иссушения составляла в среднем 1,46% (табл. 15). Этот лизиметр поливался также четыре раза, оросительная норма 4400 м³/га. Величина инфильтрации до грунтовых вод 1271 м³/га. В зоне аэрации задерживалось 3129 м³/га воды. Но испарение грунтовых вод составило значительно меньшую величину, чем в лизиметре 64—1316 м³/га.

Наиболее благополучные условия увлажнения наблюдались в лизиметре 63 с уровнем воды 1,5 м. Влажность грунта лизиметра по вертикали к концу вегетации равнялась вегетационной. Переувлажнение почвы, кроме верхней толщи (10 см) корнеобитаемого слоя, не превышало 1%. Инфильтрация оросительной воды составила 868 м³/га. Пополнение запаса влаги за счет поливных вод, израсходованное затем на испарение, 3532 м³/га. Испарение грунтовых вод за рассматриваемый период составило 1878 м³/га.

По лизиметрам приемной площадью 0,36 м² отмечаются такие же закономерности перераспределения влажности по вертикали, как и в лизиметрах площадью 1,44 м². Но степень увлажнения зоны аэрации за счет поливных вод несколько больше. По шести лизиметрам с уровнем воды 1,0, 1,5 и 2,0 м пополнение запасов влаги зоны аэрации составило соответственно 1895, 2346 и 2827 м³/га. Испарение грунтовых вод за расчетный период (с 4. VI по 25. XI) равно 3820,5, 2230,6 и 1384 м³/га.

Лизиметры, засеянные кукурузой, с нарушенной структурой грунта по распределению влажности по вертикали отличаются от хлопковых. За расчетный период (с 9. VI по 14. XII. 1964 г.) иссушения почв не наблюдалось, кроме лизиметра с уровнем воды 2,0 м.

От поверхности до уровня грунтовой воды распределение влажности однообразное. В лизиметре с уровнем воды 1,0 м отмечается приращение запаса влаги за счет большого притока воды снизу, инфильтрации атмосферных осадков и поливных вод. Среднее приращение запаса влаги составило 3,6%, наибольшее значение ее наблюдается в верхней части пахотного слоя. Подобный случай отмечается также в лизиметре с уровнем воды 1,5 м. В нижней части этого лизиметра содержание влаги в интервале глубин 0,2—0,8 м уменьшилось на 1,75—8,4% из-за снижения притока влаги снизу из грунтовых вод (табл. 16). Основная масса корневой системы кукурузы располагается в слое 0,20—0,80 м. Поэтому при нарушении естественного сложения почв приток снизу в корнеобитаемый слой уменьшается и почва иссушается. В связи с этим для нормального развития кукурузы при сравнительно глубоком залегании грунтовых вод необходимы частые поливы.

В лизиметре с уровнем воды 2,0 м к концу расчетного периода иссушение почвы составило 0,12%. Наибольшее иссушение наблюдалось на глубине 0,10 м и над уровнем грунтовых вод. Полив

Таблица 15

Содержание влага в почвогрунтах зоны аэрации в лизиметрах с хлопчатником за 1964 г., %

Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги	Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги	Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги
	4.IV	24.XI			4.VI	26.XI			5.VI	25.XI	
0,0	44,0	11,45	7,05	0,0	5,85	14,80	8,95	0,0	5,05	5,95	4,90
0,10	22,5	20,0	—2,5	0,10	21,0	20,15	—0,85	0,10	19,40	14,60	—4,85
0,20	24,45	20,45	—4,0	0,20	20,2	21,1	0,90	0,20	21,75	15,75	—6,0
0,40	28,10	23,9	—4,2	0,40	21,7	22,1	0,40	0,40	22,50	19,65	—2,85
0,80	33,65	33,0	—0,65	0,80	27,0	26,2	—0,80	0,80	24,10	20,95	—3,15
1,00	39,9	29,55	—10,35	1,20	28,65	30,65	2,0	1,20	30,55	32,25	1,70
Ср.	25,5	23,06	—2,44	1,50	26,25	26,65	0,40	1,60	29,65	27,85	—1,80
				Ср.	21,52	23,09	1,57	2,0	24,20	24,55	0,35
								Ср.	22,15	20,69	—1,46
0,0	3,95	14,97	11,02	0,0	6,35	10,75	4,40	0,0	3,05	11,0	7,95
0,10	22,37	21,60	—0,77	0,10	19,55	18,75	—0,80	0,10	21,45	19,0	—2,45
0,20	24,95	21,15	—3,80	0,20	20,70	17,45	—1,25	0,20	19,85	19,05	—0,80
0,40	28,25	22,25	—6,0	0,40	21,95	20,20	—1,75	0,40	22,35	18,60	—3,75
0,80	32,10	32,15	0,05	0,80	21,85	23,5	1,65	0,80	24,85	21,5	—3,35
1,00	36,25	30,45	—5,80	1,20	27,55	29,35	1,80	1,20	24,35	21,70	—2,65
Ср.	29,64	23,76	—6,88	1,50	32,15	27,95	—4,20	1,60	27,45	28,6	1,15
				Ср.	21,47	21,7	0,23	2,0	24,5	24,25	—0,25
								Ср.	23,50	20,46	—3,04

Примечание. Площадь лизиметров 1,44 м². Структура грунта ненарушенная.

кукурузы проводился в июне, июле и сентябре, оросительная норма 3400 м³.

При этом инфильтрация до грунтовых вод в лизиметре с уровнем воды 1,0 м составила 146,9 м³/га, 1, 5 м—30,3 и 2,0 м—42,9. Пополнение запасов влаги зоны аэрации при 1,0 м 3258 м³/га, при 1,5 м —3097 и 2,0 м—3358,4. Наибольшая инфильтрация поливных вод до грунтовых наблюдалась при первых поливах, а в последующем, когда растение имело наиболее развитую корне-

Таблица 16

Содержание влаги в почвогрунтах зоны аэрации в лизиметрах с кукурузой за 1964 г., %

Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги	Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги	Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги
	9.VI	14-XII			9.VI	14.XII			9.VI	14.XII	
	Уровень воды в лизиметре 1,0 м				Уровень воды в лизиметре 1,5 м				Уровень воды в лизиметре 2,0 м		
0.0	4,10	15,5	11,1	0,0	3,8	12,4	8.6	0.0	4,0	9,30	5,30
0,10	14,95	22.80	7.85	0,10	15,2	18,2	3,0	0,10	23,10	18,0	—5,10
0,20	20,65	21,85	1,20	0,20	26,8	18,4	—8,4	0,20	19,0	20,10	1,10
0.40	21,00	22.70	1,70	0,4	22,4	22,6	0,02	0,40	16,80	19,55	2,75
0,80	24.00	22,75	—1,25	0,8	25,95	24,2	—1,75	0,80	22,0	22,0	0.0
1,00	23,60	24,3	0,70	1.20	24,82	25,6	0.82	1,20	23,6	24,5	0,9
Ср.	18.05	21,65	3,6	1,50	24,2	25.7	1,5	1,60	25.55	20,0	—5,55
				Ср.	17,6	21.01	3,41	2,0	26.4	26,10	—0,30
								Ср.	20.06	16,94	—0,12

Примечание. Почвогрунты нарушенной структуры, площадь лизиметра 3,24 м².

вую массу, поливные воды не достигали уровня грунтовых и оставались в зоне аэрации, пополняя ее запасы.

В лизиметрах с почвой без растительности за расчетный период (19. VI—27. XI) в зоне аэрации накапливалась влага. Наибольшее ее накопление отмечено в лизиметрах с уровнем воды 1,5 м.

Рассматривая лизиметры с различными уровнями воды, нетрудно определить увеличение содержания влаги с глубиной. Во всех лизиметрах наибольшее содержание влаги наблюдается над уровнем грунтовых вод. Иная картина при сильном увлажнении почвы, в большинстве случаев средняя часть монолита до глубины 0,4—0,6 м увлажняется менее интенсивно, чем верхняя и нижняя (рис. 10).

Изменение содержания влаги с глубиной двух групп лизиметров приемной площадью 0,36 и 1,44 м² приведено в табл. 16. Несмотря на различные приемные площади лизиметров, средняя влажность почв зоны аэрации при одинаковой глубине залегания

уровня грунтовых вод примерно совпадает. Различие в отдельных интервалах, особенно в верхней части зоны аэрации, объясняется влиянием атмосферных осадков. В верхних слоях почвы к декабрю 1964 г. запас влаги резко увеличился и составил в лизиметре

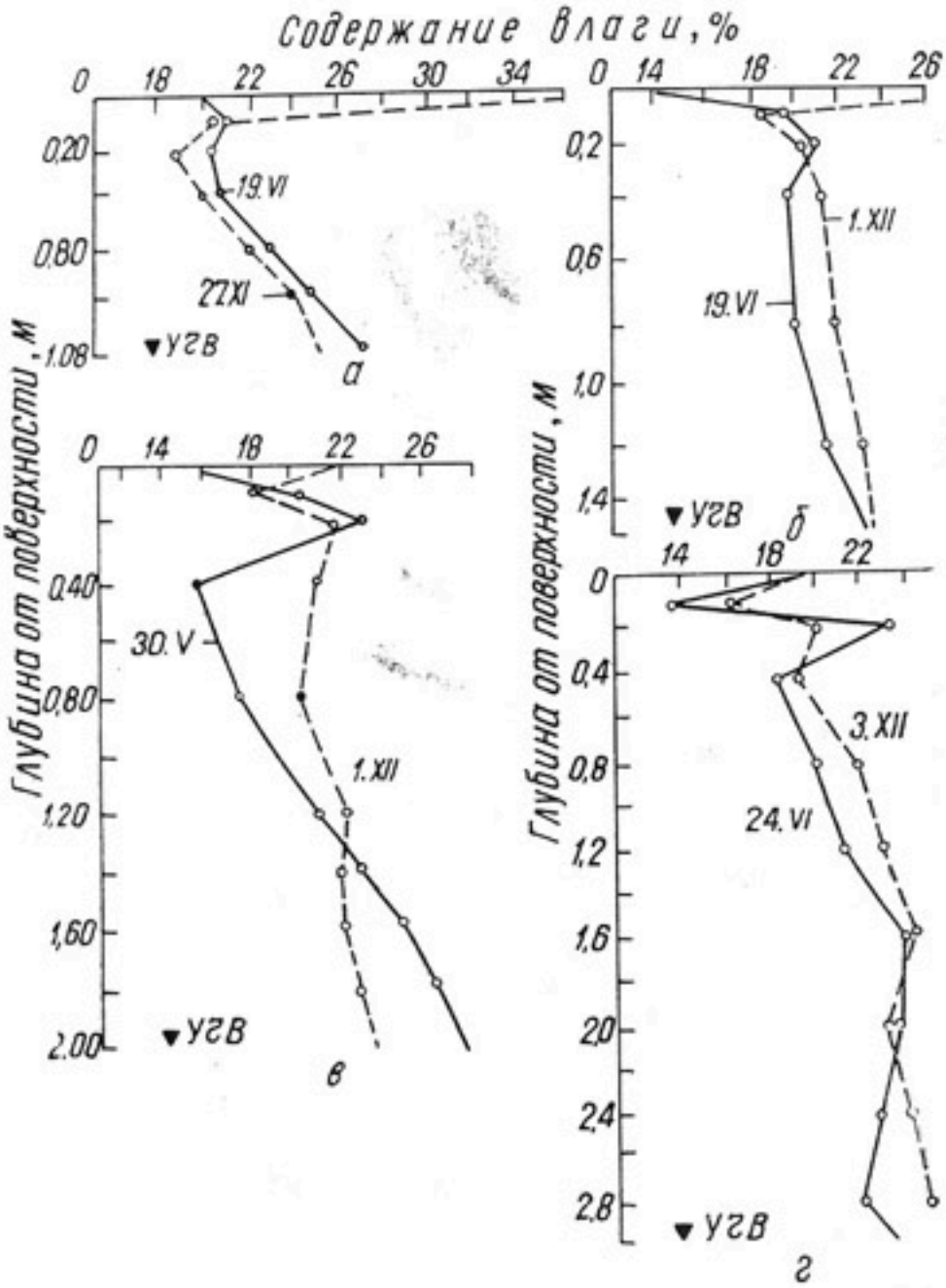

Рис. 10. График распределения влажности в зоне аэрации по лизиметрам с почвой без растительности за 1964 г.

Уровень воды в лизиметре от поверхности, м: *а*—1.0, *б*—1,5, *в*—2,0, *г*—3,0.

с уровнем воды 1,0 м на 27. XI 36,0%, 1,5 м к 1. XII—29,25% и 2,0 м к 1. XII—27,45% (табл. 17). В эти дни выпало и просочилось в грунт 7,8 мм атмосферных осадков. Но эти осадки не достигли уровня воды лизиметров, увлажнив на короткий срок верхние слои почвы, они испарились.

Таким образом, в лизиметрах с почвой без растительности большого иссушения почвы не наблюдается. Испаряющаяся влага из зоны аэрации пополняется притоком капиллярной влаги из

грунтовой воды. В лизиметрах с растительностью основной фактор иссушения почвы — большой расход влаги на транспирацию.

Таблица 17

Содержание влаги зоны аэрации в лизиметрах с почвой без растительности за 1964 г., %

Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги	Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги	Глубина отбора, м	Содержание влаги		Приращение запаса влаги
	19.VI	27.XI			19.VI	1.XII			30.V	1.XII	
Площадь лизиметра 1,44 м²											
0,0	20,10	36,00	15,9	0,0	14,45	29,25	15,20	0,0	15,55	27,45	5,9
0,10	21,10	20,55	—0,55	0,10	19,40	18,60	—0,80	0,10	20,00	17,90	—2,10
0,20	20,70	19,20	—1,5	0,20	20,60	20,40	—0,20	0,20	22,55	21,60	0,90
0,40	10,85	19,95	—0,9	0,40	19,30	21,20	1,9	0,40	19,65	20,50	0,95
0,80	25,45	26,10	0,65	0,80	20,40	22,20	1,80	0,80	17,45	20,00	2,55
1,0	27,40	25,80	—1,60	1,20	21,85	23,90	2,05	1,20	20,95	21,75	0,80
Ср.	22,6	24,4	1,8	1,50	25,0	25,60	0,6	1,60	25,45	21,85	—3,60
				Ср.	20,08	23,02	2,94	2,0	24,75	22,45	—2,30
								Ср.	20,8	21,7	0,9
Площадь лизиметра 0,36 м²											
	30.V	17.XII							30.V	3.XII	
0,0	15,65	16,0	0,35	0,0	16,30	33,20	16,90	0,0	19,55	18,75	—0,80
0,10	20,00	21,75	1,75	0,10	18,05	18,90	0,85	0,10	19,35	14,65	—4,70
0,20	21,90	20,15	—1,75	0,20	20,00	20,40	0,40	0,20	21,60	14,30	—7,30
0,40	17,90	21,50	3,60	0,40	20,40	21,00	0,60	0,40	19,50	14,60	—4,90
0,80	20,65	24,66	4,01	0,80	20,20	19,20	—1,0	0,80	20,40	18,70	—1,70
1,0	23,46	27,05	3,59	1,20	23,40	21,70	—1,7	1,20	19,10	25,70	6,6
Ср.	19,92	21,85	1,93	1,50	21,56	22,40	2,16	1,60	14,75	25,60	10,85
				Ср.	20,42	22,40	1,99	2,0	19,35	22,70	3,35
								Ср.	19,2	19,4	0,2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ БАЛАНСА ГРУНТОВЫХ ВОД

Лизиметрический метод определения величины испарения поверхностью почвы и транспирации растениями грунтовых вод применяется в условиях, отличных от естественно-полевых. Монолит и растительность в лизиметре изолированы от окружающей среды. Грунтовые воды не имеют горизонтального водообмена. Накопленная влага в лизиметре расходуется на испарение и транспирацию растениями, в связи с этим в лизиметрах создается своеобразный водный режим. Растения развиваются неравномерно.

В одних и тех же почвенно-климатических районах урожайность растений различна, поэтому транспирационные коэффициен-

ты (отношение величины транспирации влаги растением к сухой массе, накопленной за время Δt) неодинаковы.

В настоящее время распространены два метода перехода от лизиметрических условий к естественным: 1) непосредственно от лизиметров к естественным условиям; 2) с учетом урожайности культур. При первом результаты испарения, полученные лизиметрическим методом, распространяются на большие площади для региональной оценки элементов баланса грунтовых вод без каких-либо поправочных коэффициентов. При этом допускается, что испарение грунтовых вод в лизиметрах аналогично испарению в естественных условиях. Этот метод основывается на том, что физиологическое развитие и урожайность растений, температурный, солевой режим почвогрунтов зоны аэрации в лизиметрах и естественных условиях одинаковы. В действительности же в лизиметрах трудно создать такие оптимальные условия, как естественно-полевые.

В лизиметрах поливные воды расходуются в основном на питание грунтовых, пополнение запасов влаги зоны аэрации и испарение. Стока грунтовых вод за пределы лизиметра, как это наблюдается на дренированных орошаемых участках, не отмечается. Соли в монолитах лизиметров поднимаются к поверхности восходящими капиллярными токами и скапливаются в верхних слоях почвы. Несмотря на то, что грунты лизиметров Малекского опытного участка в 1963 г. были тщательно промыты (норма 5—6 тыс. м³/га), к середине вегетационного периода на поверхности отдельных лизиметров появилось пятнистое засоление. Растения развивались неравномерно. К концу вегетации в лизиметрах урожайность хлопчатника составила от 3 до 33 ц/га.

Следовательно, перенос результатов испарения, полученных лизиметрическим методом, в естественные условия без поправочного коэффициента может привести к ошибочным расчетам. На участках, где растения лучше развиваются, величина испарения завышена.

Второй метод основывается на использовании результатов лизиметрических наблюдений в естественных условиях с учетом урожайности сельскохозяйственных культур. При этом, определив урожайность сельскохозяйственных культур в естественных условиях и в лизиметре, вычисляем редукционный коэффициент

$$K_1 = \frac{У_е}{У_л},$$

где K_1 — редукционный коэффициент;

$У_е$ — урожайность сельхозкультур в естественных условиях, ц/га;

$У_л$ — урожайность сельхозкультур в лизиметре, ц/га.

Испарение в естественных условиях определяется умножением величины испарения, полученной в лизиметрах, на редукционный коэффициент

$$И_е = И_л \cdot K_1,$$

где $И_е$ — величина испарения в естественных условиях, м³/га;
$И_л$ — то же в лизиметрах, м³/га.

Однако следует указать, что испарение грунтовых вод не зависит от урожайности сельскохозяйственных культур. В орошаемых районах величина испарения складывается из потерь влаги с поверхности пахотного слоя и транспирации растениями. Транспирация связана главным образом с сосущей силой листьев, которая определяется их размерами и физиологическим развитием растений. Поэтому, как отметили выше, испарение с хлопкового поля представляет функцию удельной транспирационной поверхности растений, с одной стороны, и состояния почвенного покрова,— с другой. Это подтверждается тем, что на одних и тех же участках урожайность хлопчатника различна, хотя высота и ширина стебля хлопчатника может быть одинаковой.

Следовательно, урожайность хлопчатника не может быть критерием при расчете испарения для естественных условий. Этот метод применим в том случае, если зависимость между урожайностью и физиологическим развитием растений имеет прямолинейный характер.

Наиболее результативен, на наш взгляд, метод переноса лизиметрических данных на естественные условия — учет веса зеленой и сухой массы и удельной транспирационной поверхности растений. Этот способ отличается от предыдущего тем, что вместо редукционного коэффициента по урожайности вычисляются коэффициенты зеленого, сухого веса и удельной транспирационной поверхности растения. Зная эти коэффициенты, испарение грунтовых вод для естественных условий определим по формуле

$$И = И_л \frac{B_е}{B_л},$$

где $И$ — испарение грунтовых вод в естественных условиях (хлопковое, люцерновое поле), м³/га;
$И_л$ — то же в лизиметрах, м³/га;
$B_е$ — вес зеленой или сухой массы растений в естественных условиях, ц/га;
$B_л$ — то же в лизиметре, ц/га.

Наиболее достоверные результаты по этому методу получены на люцерновых участках. При использовании его на хлопковых полях можно получить величину испарения за вегетационный период. Для характеристики испарения по месяцам данный метод неприемлем. Для устранения этого недостатка необходимо установить серию лизиметров с одинаковыми условиями, позволяющими определить вес зеленой или сухой массы растений несколько раз за вегетацию.

Вычисление редукционного коэффициента по величине удельной транспирационной поверхности требует сложных расчетов и много времени. Необходимо определить площадь листьев, стеблей,

бутонов и др. Вместо коэффициента по удельной транспирационной поверхности можно использовать редукционный коэффициент по объему воды, вытесненному кустом растения.

$$K_0 = \frac{w_0}{v_л} = \frac{w_2 - w_1}{v_2 - v_1},$$

где w_e — объем воды, вытесненной кустом растения в естественных условиях, см³;

$v_л$ — то же из лизиметра, см³;

w_2 — объем воды в цилиндре после опускания в него куста растения с естественного поля, см³;

v_2 — то же из лизиметра, см³;

w_1 — объем воды в цилиндре до опускания куста растения с естественного поля, см³;

v_1 — то же из лизиметра, см³.

Испарение грунтовых вод в естественных условиях вычисляется по формуле

$$И = И_л \frac{W_2 - W_1}{V_2 - V_1}.$$

Резкое различие испарения на хлопковом поле наблюдается и по месяцам года. За вегетацию наибольшей величины испарение достигает во время цветения и плодообразования, наименьшей — в период всхода хлопчатника. К концу вегетации (корчевание) испарение резко снижается.

Определение величины испарения по месяцам с учетом редукционных коэффициентов по объему вытесненной воды, зеленой и сухой массы, а также удельной транспирационной поверхности растений требует выбора типичного участка или гнезд среди орошаемого массива. Вес зеленой, сухой массы и объем вытесненной растением воды находят с учетом высоты и ширины кроны и однородности густоты стояния хлопчатника. В противном случае результаты вычисления окажутся неточными, так как на различных участках орошаемого массива хлопчатник неодинаковой высоты из-за неравномерного развития (на слабозасоленных участках растения развиваются интенсивнее, чем на засоленных). Растения же различной высоты характеризуются разной транспирацией.

Таким образом, для вычисления испарения с хлопкового поля необходимо определить вес зеленой и сухой массы куста в течение вегетационного периода. При этом следует иметь в виду, что выбранный для опыта участок должен быть типичным по степени засоления почв, минерализации грунтовых вод и темпу физиологического развития растений. Обычно вес куста растений увеличивается по закону выпуклой кривой согласно его росту.

Определение веса зеленой и сухой массы, а также объема вытесненной растением воды необходимо производить не реже од-

ного раза в 10 дней в течение вегетационного периода. Для взвешивания растения рекомендуется использовать чувствительные рычажные весы. При правильном проведении опыта к концу вегетации получаем четыре зависимости

$$h=\varphi(t);\ B=f(t);\ B_1=\varphi(t);\ V_0=f(t).$$

Здесь h — высота растений, см;
B — вес зеленой массы, г;
t — время (декада, месяц);
B_1 — вес сухой массы, г;
V_0 — объем вытесненной воды кустом растений, см^3.

Такие же зависимости следует получить и для лизиметров. С этой целью для определения веса растения на типичном участке среди орошаемого массива выбирается куст растения, подобный находящемуся в лизиметре. При этом особое внимание обращается на количество листьев, высоту и ширину кроны растений, толщину стебля. Выбранные кусты (в лизиметре и естественных условиях) могут оказаться различными по внешнему виду и другим показателям физиологического развития. Но вес зеленой и высушенной массы и объем вытесненной воды необходимо определять для тех и других растений. Затем следует вычислять редукционные коэффициенты для всего периода опыта. Получим зависимости

$$K_з=f(t);\ K_с=\varphi(t);\ K_в=\varphi(t);\ K_0=f(t),$$

где $K_з$ — редукционный коэффициент по зеленому весу;
$K_с$ — то же по сухому;
K_0 — то же по объему вытесненной растением воды;
$K_в$ — то же по высоте растений.

Эти зависимости должны характеризоваться прямой линией или прямой, нарастающей от нулевой точки, затем параллельной оси абсцисс. Построив таким образом зависимости между редукционными коэффициентами и временем года, можно вычислить по вышеуказанной формуле коэффициенты перехода от лизиметра к естественным условиям, по весу сухой и зеленой массы расход влаги на испарение в естественных условиях для любого месяца вегетационного периода. Суммарное значение испарения за вегетационный период найдем по выражению

$$И_е=И_л\cdot K_{ср},$$

где $K_{ср}$ — средний редукционный коэффициент, вычисленный по соотношению

$$K_{ср}=\frac{B_{е-1}+B_{е-2}+\cdots B_{е-n}}{B_{л-1}+B_{л-2}+\cdots B_{л-n}}.$$

Здесь $B_{е-1}$; $B_{е-2}\cdots B_{е-n}$ — вес сухой или зеленой массы растений в естественных условиях на период Δt, ц/га;
$B_{л-1}$; $B_{л-2}\cdots B_{л-n}$ — то же в лизиметрах.

Следует подчеркнуть, что при определении испарения по сезонам года почвенный покров в лизиметре и на участке должен быть однороден по засолению, глубине вспашки, обработке, влажности и т. д. В том случае, если почвогрунты в зоне аэрации лизиметров отличаются по засолению, влажности от таковых в естественных условиях, необходимо определить редукционный коэффициент этих показателей.

Редукционный коэффициент по засолению почв характеризуется отношением содержания солей в почвогрунтах зоны аэрации лизиметров $P_л$ к естественным условиям $P_е$ (хлопковое, люцерновые и другие поля), т. е.

$$K_а = \frac{P_л}{P_е}.$$

Для вычисления этого коэффициента необходимо проведение ряда опытов по определению зависимости испарения грунтовых вод от засоления почвы $И = f(P_е)$ с установкой серии лизиметров.

Таким образом, для перехода от лизиметров к естественным условиям используются редукционные коэффициенты 1) по урожайности сельхозкультур (K_1), 2) по сухому весу куста растений $(K_с)$, 3) по весу зеленой массы $(K_з)$, 4) по объему вытесненной воды растением $(K_о)$, 5) по засоленности почвогрунтов зоны аэрации $(K_а)$.

Желательно, кроме того, знать редукционный коэффициент по термическим режимам почвогрунтов зоны аэрации и грунтовых вод.

Наиболее надежные данные по испарению в естественных условиях, по нашему мнению, можно получить при использовании коэффициентов $K_с$, $K_з$, $K_о$. Испарение в естественных условиях находим по формуле

$$И_с = И_л \frac{K_с + K_з + K_0}{3}.$$

Это уравнение служит для общей оценки испарения с орошаемого массива. Для точных данных водно-балансовых расчетов следует знать редукционные коэффициенты по указанным факторам, формирующим испарение. В этом случае испарение грунтовых вод в естественных условиях определяется умножением указанных коэффициентов на величину испарения в лизиметрах. После сравнения результатов выводится среднеарифметическая величина, характеризующая испарение в естественных условиях:

$$И_е = И_л \frac{\begin{matrix} i = n \\ \Sigma Ki \\ i = 1 \end{matrix}}{n},$$

где K_1 — среднеарифметический редукционный коэффициент, который может быть $1>K>1$;

n — количество факторов, формирующих испарение (в нашем случае шесть).

Редукционный коэффициент меньше 1 в том случае, если испарение в лизиметре больше, чем в естественных условиях. Если в лизиметре растения угнетенные, почвогрунты засолены и т. д., то при этом K_i больше 1. Предел изменения K_i должен быть от 0,7 до 1,5. При редукционном коэффициенте меньше 0,7 или больше 1,5 результаты вычисления испарения окажутся искаженными. Таким образом, при использовании лизиметрических наблюдений для определения испарения на больших площадях необходимо учитывать ряд обстоятельств, требующих специальных исследований. К сожалению, не имея данных по указанным коэффициентам, невозможно точно определить расход грунтовых вод на испарение с каких-либо территорий.

Ниже приводим результаты вычисления испарения с хлопкового и люцернового полей Малекского опытного участка, расположенного на Шорузякском понижении в Голодной степи. При этом использован редукционный коэффициент по сухому весу стебля и для сравнения — по урожайности растений (хлопчатник, люцерна), полученный к концу вегетации.

В разных лизиметрах редукционные коэффициенты различны (в лизиметрах с угнетенными растениями редукционный коэффициент больше). Мы полагаем, что редукционный коэффициент позволяет установить величину испарения с больших территорий для любых растений при данных об испарении по лизиметрам и переходных коэффициентах по зеленому и сухому весу, урожайности культуры, по засоленности почвогрунтов зоны аэрации и глубине залегания уровня грунтовых вод.

Величина испарения хлопчатником в лизиметре значительно отличается от значения, полученного с учетом редукционного коэффициента (табл. 18). Наибольшей точностью отличается величина испарения, рассчитанная по редукционному коэффициенту, равному 1 или близкому к ней. Редукционный коэффициент, близкий к 1, получен в лизиметрах 63, 64, 65 площадью по 1,44 м², глубина до воды в них 1,0, 1,5 и 2,0 м. Более достоверные величины испарения грунтовых вод для хлопкового поля при таких же глубинах залегания соответственно равны 5096,0, 4245,7, 2213,4 м³/га. Эти цифры получены за апрель — ноябрь при минерализации грунтовых вод в лизиметрах и естественных условиях 3,5—7,0 г/л.

Как уже отмечалось, наиболее точные данные по испарению с применением редукционных коэффициентов по зеленому и сухому весу можно получить на люцерновых полях. Это объясняется тем, что грунтовые воды расходуются в основном путем транспирации. Испарение с поверхности почвы составляет сравнительно малую величину.

Редукционный коэффициент для перехода от лизиметра к естественным условиям подсчитан для пяти укосов люцерны (отдельно для зеленой и сухой массы) (табл. 19). При суммировании их можно определить среднеарифметический редукционный коэффициент.

В люцерновых лизиметрах, как и в хлопковых, наиболее достоверна величина испарения при $K_{ср}$, равная 1 или близкая к ней. Испарение с люцернового поля третьего года посева при глубинах залегания уровня грунтовых вод 1,0, 1,5, и 2,0 м в Голодной степи составляет соответственно 11347,8, 14125,0 и

Таблица 18

Переходные коэффициенты по весу сухой массы стебля и урожайности хлопчатника (1963 г.)

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Глубина до воды в лизиметре, м	Годовое испарение лизиметра, м³/га	Редукционный коэффициент по урожайности	Редукционный коэффициент по величине сухой массы	Испарение грунтовых вод в естественных условиях м³/га с учетом	
						урожайности	веса сухой массы
60	1,0	2,0	1157,5	5,08	1,48	6801,0	1713,1
61	1,0	1,5	2103	2,07	1,24	4353,2	2587,7
62	1,0	1,0	5080	0,88	0,744	44700,4	3759,5
63	1,44	1,5	3724,3	0,95	1,33	3568,0	4953,2
64	1,44	1,0	5295	0,88	1,07	4769,6	5665,2
65	1,44	2,0	2459,2	0,96	0,89	2360,8	2168,6
67	3,24	2,0	623,6	7,7	2,41	4801,7	1502,8
68	3,24	1,5	1082	6,68	2,62	7227,7	2834,8
69	3,24	1,0	1484,3	9,8	4,01		5952,0

Примечание. Урожайность хлопчатника в естественных условиях по совхозу „Малек" равна 29,4 ц/га.

10260 м³/га в год. При этом минерализация грунтовых вод равна 3,0—5,5 г/л, почвогрунты слабозасоленные.

Используя описанную методику, мы проанализировали результаты лизиметрических наблюдений девяти гидрогеологических и инженерно-геологических партий МГ УзССР, выполненных за последнее десятилетие в различных районах Узбекистана. Этими партиями в 1964—1965 гг. организованы экспериментальные участки в Голодной степи, Хорезмском оазисе, Центральной Фергане, Зарафшанской долине, на конусе выноса р. Шерабад, в долине р. Кашкадарьи, Чирчикской долине, Бухарском оазисе. На экспериментальных участках устанавливали лизиметры с монолитами площадью в основном 1,44 м² (размер сторон 1,2×1,2 м) конструкции М. С. Алимова, метеорологические приборы, режимные скважины. Общее количество лизиметров на этих участках составило 276 штук, по ним проводились наблюдения в 1966—1969 гг.

Литологическое строение пород зоны аэрации в лизиметрах и на экспериментальных участках различное. В Голодной степи они представлены суглинками, Чирчикской долине с поверхности до глубины 1,2 м — суглинками средней плотности, подстилаемыми

Таблица 19

Переходные коэффициенты по весу зеленой и высушенной массы люцерны

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Глубина до воды в лизиметре, м	Испарение+транспирация в лизиметре, м³/га	Первый укос		Второй укос		Третий укос		Четвертый укос	
				$K_{з-1}$	K_1	$K_{з-2}$	K_2	$K_{з-3}$	K_3	$K_{з-4}$	K_4
22	0,1	2,0	10554,5	0,51	0,73	0,38	0,56	0,49	0,67	0,98	1,45
23	0,1	2,0	17845,3	0,35	0,5	0,48	0,81	0,92	1,53	0,63	0,89
24	0,1	1,5	14019,7	0,43	0,54	0,58	0,93	0,61	0,83	0,64	0,99
25	0,1	1,5	9234	0,31	0,5	0,63	0,86	0,37	0,47	1,21	1,9
26	0,1	1,0	11758,9	0,46	0,62	0,48	0,86	0,77	1,0	1,01	1,55
27	0,1	1,0	3454	0,44	0,69	1,01	1,60	0,98	1,2	3,4	4,35
28	0,1	1,5	16956,4	0,31	0,43	0,58	0,97	0,66	0,94	0,68	1,06
29	0,1	1,5	18095,8	0,43	0,52	0,44	0,68	0,43	0,64	0,67	0,99
30	0,1	1,0	12168,5	0,31	0,50	0,81	1,06	1,25	1,71	0,9	1,45
31	0,1	1,0	13898,5	0,34	0,47	0,70	1,01	0,59	0,83	0,33	1,5

Номер лизиметра	Пятый укос		$K_{ср}$ по зеленой массе люцерны	$K_{ср2}$ по сухому весу люцерны	$K_{ср} = \frac{K_{ср1} - K_{ср}}{2}$	Испарение люцерной в естественных условиях, м³/га		
	$K_{з-5}$	K_5				с учетом урожайности зеленой массы $(K_{ср})_1$	с учетом веса сухой массы $(K_{ср2})$	с учетом $K_{ср}$
22	0,47	0,6	0,566	0,8	0,68	5973,8	8444	7208,7
23	0,64	0,73	0,6	0,89	0,746	10707,18	15918	13313
24	0,75	1,91	0,6	0,8	0,7	8414,8	11215,76	9813,8
25	0,97	1,27	0,698	1,0	0,849	6445,3	9324	7840
26	1,2	1,7	0,784	1,146	0,965	9219	13476	11347
27	2,8	2,55	1,626	2,078	1,852	5616	7177	6397
28	1,1	1,7	0,666	1,0	0,833	11293	16956,4	14125
29	0,83	1,2	0,56	0,806	0,683	10133	14584,8	12359
30	1,1	1,4	0,874	1,224	1,049	10664,7	14894	12765
31	0,94	1,27	0,69	1,016	0,853	9600	14120,7	11855

галечниками в пересыпке с песком, Хорезмском оазисе до глубины 1,6 м — суглинками, далее — среднезернистыми и тонкозернистыми песками. В долине р. Зарафшана породы сложены плотными суглинками (в интервале глубин 0,25—0,35 м залегал шоховый горизонт), на конусе выноса р. Шерабада — супесчано-суглинистыми отложениями, в долине р. Кашкадарьи с поверхности до глу-

бины 1,2 м — средними супесями, далее до глубины 3 м — суглинками. Мощность пахотного слоя в лизиметрах 35—40 см. По средней части лизиметров создавалась одна поливная борозда, по краям — 0,5 борозды.

Замеры испарения грунтовых вод и инфильтрации поливных вод и атмосферных осадков проводились автоматическими приборами из пульта управления по методике, разработанной автором. Посев хлопчатника в лизиметре и окружающем поле производился квадратно-гнездовым способом 50×50 и 60×60 см. Средняя урожайность хлопчатника составила 23,4—37,1 ц/га. Минерализация грунтовых вод в лизиметрах, за исключением долин р. Чирчика и Зарафшана, поддерживалась в пределах 3—7 г/л путем доливов и отливов. Грунтовые воды в лизиметрах долин Чирчика и Зарафшана были пресные с плотным остатком до 1 г/л. Принятая оросительная норма соответствовала проектной областных управлений оросительных систем Министерства мелиорации и водного хозяйства Узбекской ССР. Полив хлопчатника в вегетацию производился три раза, норма 1200—1700 м³/га. Все агротехнические мероприятия, предусмотренные по графику, выполнялись в установленные сроки и соответствовали мероприятиям тех хозяйств, где размещались экспериментальные участки. Зимой производилась промывка пахотного слоя и толщи зоны аэрации лизиметров. Содержание солей и анионов хлора изучалось в лаборатории, пробы почвогрунтов отбирали из пахотного слоя зоны аэрации. Концентрация солей в монолите лизиметра и окружающем хлопковом поле почти одинакова. Уровень грунтовых вод в лизиметрах поддерживался на глубинах 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 и 3,0 м ниже поверхности земли. Повторность опыта трехкратная. В вегетацию непрерывно наблюдали за физиологическим развитием хлопчатника.

Результаты экспериментальных исследований позволили построить три совмещенных графика. На первом (рис. 11) показана закономерность изменения испарения грунтовых вод за вегетационный период, на втором и третьем — изменение величины инфильтрации поливных вод, атмосферных осадков в зависимости от глубины залегания уровня грунтовых вод хлопковых полей.

В табл. 20 представлены среднемноголетние данные испарения грунтовых вод хлопчатником за вегетационный период апрель — сентябрь по орошаемым оазисам Узбекистана за 1961—1969 гг.

В орошаемых районах Узбекистана испарение грунтовых вод по мере увеличения их уровня уменьшается, при глубине уровня грунтовых вод 3,5 м — не представляет практического интереса. Наибольшее испарение наблюдается при глубине уровня грунтовых вод менее 0,5 м. В вегетацию наибольшее испарение в июле—августе — в период цветения и плодообразования хлопчатника, когда он потребляет наибольшее количество влаги из грунтовых вод.

За указанный период испарение грунтовых вод при глубине залегания уровня 1,0 м по Голодной степи составило 257 мм, Каршинской степи —365, Хорезмскому оазису 268, Зарафшанской долине — 348, Чирчикской долине — 256, Бухарскому оазису — 368, дельте р. Шерабада —174,7 и Центральной Фергане —533 мм. При глубине уровня 1,5 м испарение грунтовых вод по орошае-

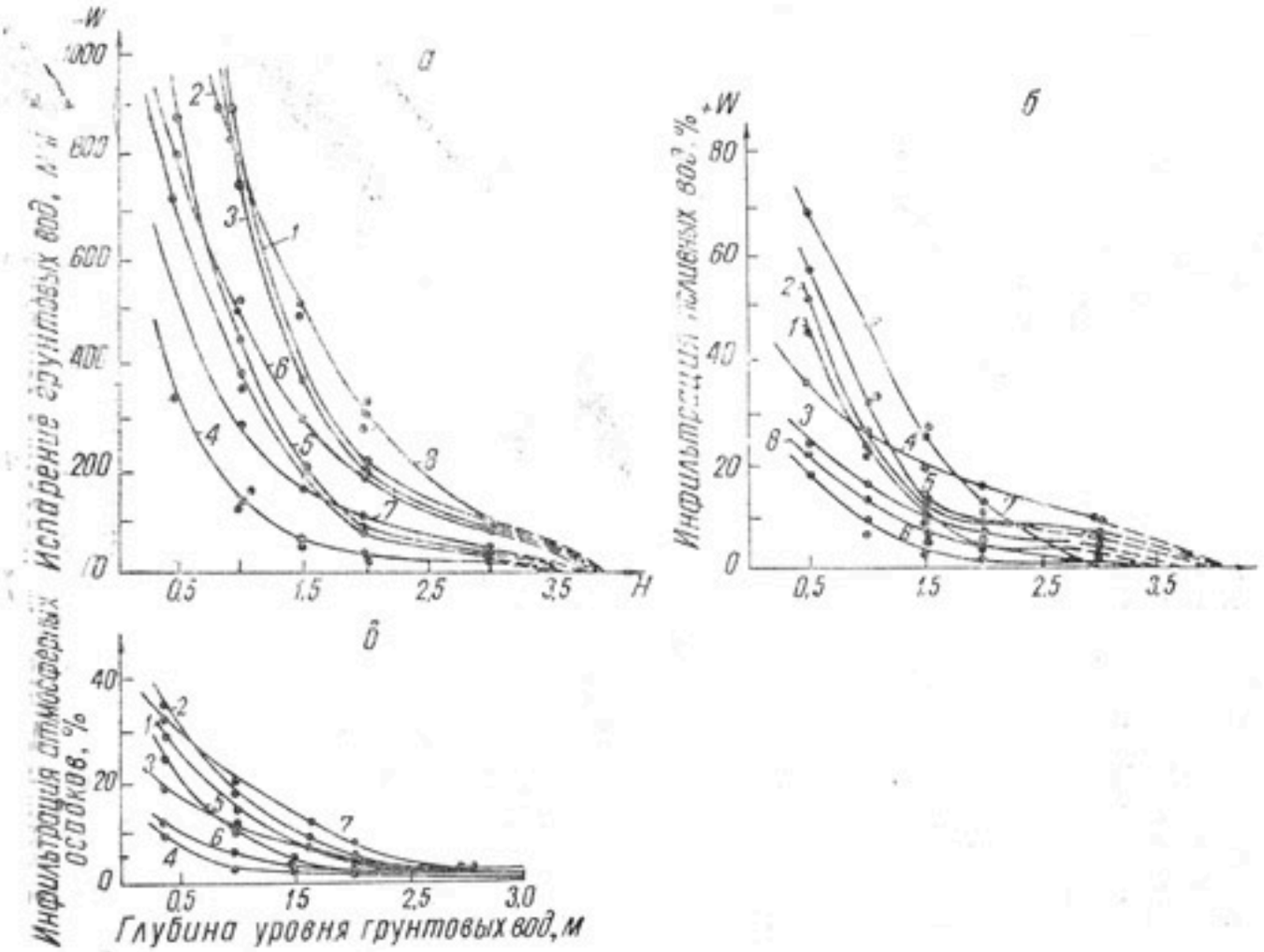

Рис. 11. Кривые зависимости испарения и инфильтрации от глубины залегания уровня грунтовых вод по орошаемым районам Узбекистана (составил М. С. Алимов по результатам лизиметрических наблюдений).

Графики испарения грунтовых вод (*а*), инфильтрации поливных вод (*б*), инфильтрации атмосферных осадков (*в*) по районам:
1—долина р. Чирчика, *2*—Центральная Фергана, *3*—Бухарский оазис, *4*—дельта р. Кашкадарьи, *5*—Голодная степь, *6*—дельта р. Шерабада, *7*—центральная часть долины р. Зарафшана *8*—Хорезмский оазис.

мым районам республики уменьшается в 1,5 раза, 2 м —в 2 раза, 3 м —3 раза.

Изменение испарения грунтовых вод по площади зависит от климатических условий, режима орошения, литологического строения пород зоны аэрации, физиологического развития хлопчатника. В Хорезмском оазисе испарение грунтовых вод значительно меньше, чем по другим оазисам Узбекистана, так как здесь поступление тепла на поверхность меньше. Водосодержащие породы представлены двухслойной средой: снизу — пески среднезернистые, сверху — суглинки мощностью 1,6 м. В Цент-

ральной Фергане испарение грунтовых вод хлопчатником более интенсивное и составляет за год при глубине уровня 3 м 390—410 мм. Инфильтрация оросительных вод в Хорезмском оазисе значительно больше, чем в других оазисах республики.

Наименьшие значения инфильтрации атмосферных осадков отмечены в дельте р. Кашкадарьи и Шерабада. На этих землях

Таблица 20

Испарение грунтовых вод хлопчатником при различных глубинах залегания их уровня (среднемноголетние данные за 1966—1969 гг.).

Орошаемый район	Глубина залегания уровня грунтовых вод м,				
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Голодная степь	614,4 / 789,1	473,1 / 603,2	330,0 / 417,8	196,8 / 252,0	133,2 / 168,1
Центральная Фергана	869,0 / 912,4	788,1 / 877,8	770,9 / 806,8	534,3 / 603,4	401,2 / 462,6
Бухарский оазис	—	638,5 / 774,3	276,9 / 412,1	114,9 / 210,6	21,7 / 131,9
Дельта р. Кашкадарьи	—	630,1 / 767,0	416,6 / 540,0	270,1 / 361,3	156,0 / 210,9
Долина р. Чирчика	—	416,0 / 480,1	237,5 / 288,5	114,8 / 152,9	52,9 / 76,6
Дельта р. Шерабада	—	309,8 / 363,9	259,7 / 327,7	210,2 / 345,4	91,1 / 211,3
Хорезмский оазис	—	469,7 / 562,9	305,0 / 365,2	202,4 / 257,0	37,8 / 79,6
Центральная часть долины р. Зарафшана	—	605,8 / 725,5	292,4 / 413,9	103,6 / 203,0	44,6 / 95,5

Примечание. В числителе—испарение грунтовых вод за вегетационный период, в знаменателе—за год, мм.

большая часть осадков расходуется на пополнение запасов влаги зоны аэрации. В Центральной Фергане, в долине реки Зарафшана инфильтрация атмосферных осадков составляет значительную величину.

Таким образом, среди орошаемых массивов Узбекистана наибольшее испарение грунтовых вод — в Центральной Фергане, Бухарском оазисе, дельте р. Шерабада, в связи с чем на этих землях грунтовые воды высокоминерализованные, в зоне аэрации содержатся большие запасы токсичных солей. Наибольший процент инфильтрации поливных вод в Хорезмском оазисе, Цент-

ральной Фергане и Голодной степи. В дельтах р. Шерабада и Кашкадарьи инфильтрация атмосферных осадков значительно меньше, чем по другим районам республики.

ОБОБЩЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ВОДНО-СОЛЕВОЙ БАЛАНС ОРОШАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ УЗБЕКИСТАНА

На основе наблюдений десяти гидрогеологических и инженерно-геологических партий Министерства геологии Узбекской ССР составлена серия аналитических карт по орошаемым массивам республики, в которых приведены количественные характеристики приходных и расходных элементов баланса грунтовых вод.

Искусственное орошение земель долин р. Сырьдарьи и Амударьи возникло в глубокой древности и развивалось на протяжении шести тысячелетий. Наибольшее развитие ирригация получила в текущем столетии за счет повсеместного развития хлопководства.

При осуществлении государственной программы развития сельского хозяйства за последние 15 лет достигнуты большие успехи. По данным института «Средазгипроводхлопок», в бассейне р. Сырдарьи построено свыше 1000 каналов общей протяженностью 19,6 тыс. км, в том числе межхозяйственных каналов 17,27 тыс. км. Для регулирования поверхностного стока созданы водохранилища на р. Сырдарье и ее притоках общей полезной емкостью 8,3 км^3. Ведется строительство трех крупных водохранилищ Кайракумского, Андижанского и Туябугузского общей емкостью 17,3 км^3. Существует разветвленная сеть коллекторов и дрен длиною 39,2 тыс. км, которые разгружают орошаемые массивы от избыточных грунтовых и поверхностных вод, а также от вредных для сельскохозяйственных растений солей. Построено 618 скважин вертикального дренажа.

В бассейне р. Амударьи в настоящее время действует межхозяйственная оросительная сеть — 13,8 тыс. км, внутрихозяйственная — 81,8 тыс. км. Построены Каттакурганское, Чимкурганское, Пачкамарское, Южно-Сурханское, Учкызылское водохранилища общей полезной емкостью 2,65 млн. м^3. На р. Амударье завершается строительство Тахиаташской плотины и Туямуюнского гидроузла с водохранилищем емкостью 5,3 млд. м^3.

В настоящее время общая площадь орошаемых земель по бассейну Аральского моря достигла 5,5 млн. га. Для полива этих земель расходуется 92,5 млрд. м^3 воды в год.

Коэффициент полезного действия оросительных систем невысокий: по бассейну р. Сырдарьи —0,61, р. Амударьи —0,49. В связи с этим наблюдаются большие потери воды на фильтрацию, уровни минерализованных грунтовых вод повышаются, орошаемые земли, расположенные в слабодренированных и недрениро-

ванных зонах, подвергаются вторичному засолению, в результате урожайность сельскохозяйственных культур снижается.

Для обоснования рациональной схемы мелиоративных мероприятий по ликвидации засоления орошаемых земель Узбекистана научно-производственным объединением «Узбекгидрогеология» ведется региональное изучение современных гидрогеологических условий этих земель. Проводятся специализированные гидрогеологические и инженерно-геологические съемки для ирригационного освоения территорий и обоснования мелиоративных мероприятий. Изучается режим и баланс подземных вод, производится оценка их запасов, осуществляется гидрогеологическая типизация и районирование территорий по направленности гидрогеологического процесса и т. д. При этом большое внимание уделяется изучению режима и баланса грунтовых вод.

Методика расчета регионально-водно-солевого баланса грунтовых вод следующая. Орошаемые массивы (Ферганский — 1052 тыс. га, Голодностепский —1060, Чирчик-Ангренский —539,8, Зарафшанский—520,56, Кермине-Кенимехский —74,5, Бухарский—245,9, Каракульский—57,15, Китабо-Шахрисабзский—217,4, Каршинский —1224,6, Шерабад-Сурхандарьинский —502,4, Хорезмский и Амударьинский районы КК АССР—522,0 и дельта р. Амударьи 716,6) рассматривались как самостоятельные балансовые районы.

Краевые границы проведены по контуру распространения орошения. За нижнюю границу балансового района принята кровля регионального водоупора — палеогеновые и неогеновые отложения, верхнюю — уровень грунтовых вод. Для этих районов определялись приходные и расходные статьи водно-солевого баланса грунтовых вод. Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод определяли на основе данных лизиметрических наблюдений десяти гидрогеологических станций Министерства геологии Узбекской ССР. Потери воды из ирригационных систем, дренажный сток грунтовых вод установили по данным областных управлений оросительных систем Министерства мелиорации и водного хозяйства УзССР (табл. 21, 22).

В Ферганском бассейне грунтовых вод в региональном плане происходит рассоление территории. Интенсивность выноса солей в 1967 г. составляла 8,75 млн. т. В Зарафшанском бассейне скорость выноса токсичных ионов солей хлора и сульфата соответственно равна 116,1 и 159,7 тыс. т. год. В этих бассейнах основные источники питания грунтовых вод — инфильтрационные оросительные воды.

В сумме приходных статей баланса грунтовых вод 296,9 м³/сек подземный приток составил 7,1%, инфильтрация атмосферных осадков —1,1%, питание грунтовых вод за счет потерь из русел каналов и естественных водотоков —77,3% и орошаемых площадей —14,5%. Накопленные грунтовые воды расходуются главным образом на выклинивание в русло р. Сырдарьи (53,8%), испаре-

Таблица 21

Обобщенный региональный баланс подземных вод по орошаемым районам Узбекистана за 1967 г.

Балансовый район	Площадь, тыс. га	Приходные статьи, м³/сек				Сумма приходных статей баланса подземных вод, м³/сек	Расходные статьи, м³/сек				Сумма расходных статей балансов подземных вод, м³/сек	Баланс подземных вод, м³/сек	Изменение запасов грунтовых вод, м³/сек, $\pm\Delta h \cdot \mu$
		подземный приток	инфильтрация атмосферных осадков	фильтрация воды из каналов и естествен. водост.	инфильтрация из орошаемых площадей		подземный сток	испарение и транспирация грунтовых вод	дренажный сток и вклинивание в водотоки	отбор подземных вод скважинами			
Ферганская межгорная впадина	1052,0	21,0	3,5	229,47	43,0	296,97	0,10	78,4	214,9	16,83	310,23	−13,26	−5,33
Голодная степь	1060,0	9,08	3,74	37,05	38,54	88,41	0,37	45,41	34,21	3,24	83,23	+5,18	+6,58
Чирчик-Ангренский бассейн и Дальверзинская степь	539,8	10,34	1,62	31,3	20,56	63,82	2,98	10,08	36,47	13,32	62,85	+0,97	+0,3
Зарафшанская межгорная впадина	520,56	7,77	2,48	23,18	7,66	41,09	0,49	17,35	18,0	7,14	42,98	+1,89	−1,07
Кермине-Кенимехский оазис	74,5	2,55	0,96	1,44	2,72	7,67	0,57	2,42	4,61	0,06	7,66	+0,01	+0,007
Бухарский оазис	245,9	0,57	3,85	11,93	14,99	31,24	0,6	15,66	13,98	3,49	33,73	−2,49	−0,51
Каракульский оазис	57,15	0,09	0,99	1,81	3,15	6,04	0,06	3,99	1,96	0,05	6,06	−0,02	−0,19
Китабо-Шахрисабзская межгорная впадина	217,4	8,47	0,26	5,07	0,5	14,3	4,83	1,53	6,58	1,32	14,26	+0,04	+0,42
Каршинская степь	1224,6	4,83	1,37	7,98	1,41	15,59	0,07	12,49	0,61	0,71	13,88	+1,71	+3,47
Шерабад-Сурхандарьинская депрессия	502,4	15,32	2,54	22,90	17,53	58,29	17,08	15,67	15,56	1,42	49,73	+8,56	+4,23
Хорезмский оазис и Амударьинский район, КК АССР	522,0	—	—	86,0	27,4	113,4	0,10	70,04	42,84	1,14	114,12	−0,72	−0,77
Дельта р. Амударьи, КК АССР	716,6	—	—	48,3	39,4	87,7	—	68,9	9,0	0,02	77,92	+9,78	+2,84
Итого	6732,91	80,02	21,31	506,33	216,86	824,52	27,25	341,94	398,72	48,74	816,61	+7,87	+9,99

Таблица 22

Обобщенный солевой баланс орошаемых территорий Узбекистана за 1967 г.

Балансовый район	Площадь, тыс. га	Поступление солей, тыс. т/год			Сумма приходных статей солевого баланса, тыс. т/год	Вынос солей, тыс. т/год			Сумма расходных статей солевого баланса, тыс. т/год	Баланс солей, тыс. т
		с атмосферными осадками	с подземными водами	с поверхностными водами		подземными стоками	водами ирригационной, коллекторно-дренажной сети и сетью естественных водотоков	откачиваемыми водами из скважин		
Ферганская межгорная впадина	1052,00,	246.90	318,61	6418.18	6984,69	0,85	16539.95	193,76	15734.56	—8749,87
Голодная степь	1060.00	358,83	139,64	6092,76	6590,23	279.04	4224,28	177,30	4680.62	1909,61
Дальверзинская степь	51.13	0,33	3,64	988,40	992,37	—	785,15	6.60	833,35	159,02
Зарафшанская межгорная впадина	520,56	190,08	533.39	951,10	1682,30	26,56	1255,60	49,53	1331.70	350,60
Кермине-Кенимехский оазис	74,50	19,43	296,39	2211.30	2527,12	5,54	1746,55	6.97	1759,10	768,02
Бухарский оазис	245,90	40.30	45,34	871.66	2371,30	90,59	1508,09	309,49	1908,11	463,17
Каракульский оазис	57.15	8,64	13,86	228.45	329.45	13,76	237,78	7,71	259,25	70.20
Каршинская степь	1224,60	49.45	92,90	658,36	800,71	112,20	139,80	12,50	264,55	536,16
Шерабад-Сурхандарьинская депрессия	502,40	143,84	374,53	1668,48	2186,71	—	1626,59	23,64	1938,3	248,5
Хорезмский оазис и Амударьинский район, КК АССР	522,00	48,20	—	3157.40	3205.60	1,65	7932,00	28,80	7962.45	—4756,80
Низовья р. Амударьи, КК АССР	716.60	113,40	—	4788,00	4401,40	—	2707,00	—	2707,00	2194.40
Итого	6026,84	1220,40	1818,30	28041.09	32072,02	530,19	38702.79	816,3	44059.61	—6806,88

ние (26,4%) и сток в дрены и коллекторы (18,5%). Запасы грунтовых вод с расходом 13,3 м³/сек уменьшались.

В отличие от других районов в Китабо-Шахрисабзской депрессии, где большая часть территории занята под богарное земледелие, сады и древесные насаждения, в сумме приходных статей баланса подземных вод 14,3 м³/сек подземный приток составил 59,2%, питание грунтовых вод за счет потерь из русла естественных водотоков —35,5%. Инфильтрация оросительных вод не превышает 3,5%, грунтовые воды расходуются на подземный сток (33,9%) и выклинивание в русло р. Кашкадарьи (37,2%). Испарение поверхностью почвы и транспирация растительностью грунтовых вод составляют 1,5 м³/сек.

Результаты исследований показывают, что по отдельным бассейнам грунтовых вод в региональном плане происходит рассоление земель, а в центральных частях бассейнов и слабодренированных зонах — соленакопление и засоление орошаемых земель. Так, Приташкентский бассейн грунтовых вод характеризуется как интенсивно дренированный с отрицательным солевым балансом. В то же время в Дальверзинской степи наблюдается соленакопление. Интенсивность его в 1968 г. составила 159,1 тыс. т. Засоление земель происходит главным образом за счет накопления ионов сульфата и кальция.

В районах со смешанным солевым балансом в региональном плане отмечается соленакопление, увеличивается содержание солей в грунтовых водах и почвогрунтах зоны аэрации.

В Голодной степи грунтовые воды формируются в основном за счет потерь из каналов (37, м³/сек) и орошаемых площадей (38,5 м³/сек). Подземный приток со стороны Чирчик-Ангренского бассейна, Туркестанского хребта и Ферганской долины имеет подчиненное значение —9,1 м³/сек. В расходной части баланса испарение и транспирация грунтовых вод составляют 51,4%, подземный отток в Кызылкумы —0,4%, сток по коллекторам и дренам — 36,4%. За расчетный 1967 г. происходило накопление грунтовых вод с расходом 5,2 м³/сек. Интенсивность соленакопления 2,18 млн. т/год. Сумма приходных статей солевого баланса составляет 6,68 млн. т, расходных —4,50 млн. т. Содержание иона хлора уменьшилось за год на 235,9 тыс. т, сульфата увеличилось на 1,3 млн. т.

Таким образом, в Голодной степи наряду с накоплением грунтовых вод развивается сульфатное засоление.

На конусе выноса р. Шерабаддарьи и степи Кызырыкдара отмечен процесс засоления орошаемых территорий. За расчетный 1967 г. содержание иона хлора увеличилось на 10,2 тыс. т, годовой прирост солей составил 248,5 тыс. т.

В этом районе, как и в Голодной степи, основные источники питания грунтовых вод — инфильтрационные воды из ирригационных систем (41,8%) и орошаемых площадей (45,1%). Инфильт-

рация атмосферных осадков составляет 6,6%, подземный приток— 6,5%. В сумме расходных статей баланса грунтовых вод 20,7 м³/сек потери на испарение составляют 32,5%, дренажный сток —29,6%, подземный сток и отбор подземных вод скважинами —11,4%. В районах с положительным солевым балансом наблюдается накопление грунтовых вод и солей во всей толще четвертичных отложений.

В Каршинской степи прирост грунтовых вод в 1967 г. равен 1,7 м³/сек, солей—536,2 тыс. т. Содержание солей увеличивается за счет гидрокарбонатов кальция и магния на 495,3 тыс. т, иона хлора — на 32,5, сульфата — на 8,3.

В Бухаро-Каракульском оазисе режим грунтовых вод стабилизировался. Больших накоплений грунтовых вод и их убыли за год не наблюдается, что характерно для субаэральных дельт аридной зоны СССР. Интенсивность соленакопления на единицу площади в этом районе больше, чем в Каршинской степи. В толще четвертичных отложений в 1967 г. содержание солей увеличилось на 533,3 тыс. т, в том числе в Бухарском оазисе — на 463,2 и Каракульском оазисе — на 70,2 тыс. т.

Дельта р. Амударьи, сложенная суглинками и супесями с прослойками песков, представляет бессточный бассейн грунтовых вод. Фильтрационные свойства водосодержащих пород четвертичных отложений не превышают 1—3 м/сутки. Грунтовые воды с минерализацией 6—25 г/л залегают неглубоко от поверхности (1,5—5 м). Подземный сток не обеспечен. Происходит ежегодное соленакопление. В 1967 г. в толще четвертичных отложений содержание солей увеличилось на 2,2 млн. т. Основные источники солевого питания орошаемых территорий — ирригационные (4,4 млн. т) и фильтрационные (378 тыс. т) воды из русла р. Амударьи. Накопленные соли расходуются только на дренажный сток. За расчетный период 1967 г. отмечено накопление грунтовых вод с расходом 9,8 м³/сек.

В сумме приходных статей баланса грунтовых вод 87,8 м³/сек ирригационное питание их составило 68,8 м³/сек, испарение и транспирация —68,9 м³/сек.

Следует отметить, что на основе палеогеографического анализа результатов балансовых исследований для отдельных районов Узбекистана составлено уравнение палеобалансов и рассчитан баланс грунтовых вод до начала орошения.

В Зарафшанской межгорной впадине, которая относится к бассейну грунтовых вод с отрицательным солевым балансом, до начала орошения грунтовые воды формировались за счет подземного притока (7,8 м³/сек) и потерь воды из естественных водотоков (11,5 м³/сек). Эти воды расходовались на выклинивание в русло р. Зарафшана (11,4 м³/сек) и испарение почвой и естественной растительностью (7,7 м³/сек). В настоящее время сумма приходных и расходных статей баланса грунтовых вод впадины увеличилась почти вдвое (с 20,6 до 40,9 м³/сек).

В Голодной степи в естественных условиях до интенсивного орошения происходило соленакопление. До орошения более 70% расходных статей баланса грунтовых вод составляло испарение. Величина выклинивания в русло р. Сырдарьи равна 23%, подземный сток в Кызылкумы —7%. Грунтовые воды накапливались за счет подземного притока со стороны Туркестанского хребта (6,0 м³/сек), Чирчик-Ангренского бассейна (3 м³/сек) и Ферганской долины (0,1 м³/сек).

В Хорезмском оазисе и Амударьинском районе КК АССР грунтовые воды до начала орошения формировались исключительно за счет потерь из р. Амударьи (32,1 м³/сек). Эти воды (31,9 м³/сек) расходовались на испарение почвой и естественной растительностью. Подземный сток за пределами оазиса не превышал 0,2 м³/сек.

Таким образом, в естественных условиях в Хорезмском оазисе так же, как в Голодной степи, происходило соленакопление. В результате непроизводительных потерь воды из ирригационных систем в 1967 г. в Голодной степи сумма приходных статей баланса грунтовых вод увеличилась с 9,1 до 88,4 м³/сек, в Хорезмском оазисе — с 32,1 до 113,4 м³/сек.

В Хорезмском оазисе в результате применения густой коллекторно-дренажной сети и высокой агротехники наблюдается рассоление орошаемых земель. Интенсивность вымыва солей в 1967 г. составляла 4,8 млн. т, хлора иона — 1,1, сульфата — 1,5. При этом сток солей по дренам и коллекторам равнялся 7,6 млн. т. Поэтому для коренного улучшения мелиоративного состояния орошаемых земель необходимо усилить вынос солей с территории и добиться отрицательного солевого баланса с применением комплекса мелиоративных и агротехнических мероприятий.

Как мы видим, для количественной оценки направленности водо- и солеобмена в грунтовых водах следует развивать водно-балансовые исследования в орошаемых районах.

В будущем площадь орошаемых земель Узбекистана увеличится с 2674—6344 тыс. га до 9323 тыс. га. Водозабор из источников орошения (брутто) повысится соответственно с 44,17—72,93 млр. км³ до 106,4 млр. км³. Коэффициент полезного действия каналов будет доведен до 0,80. Эти грандиозные по масштабу хозяйственные мероприятия ставят перед гидрогеологами, мелиораторами и проектировщиками актуальную задачу — прогнозировать изменение гидрогеолого-мелиоративных условий орошаемых территорий и разработать рациональную схему мелиоративных мероприятий.

Принимая за основу проектные данные института «Средазгидроводхлопок» по ирригационно-хозяйственным условиям орошаемых территорий к будущему, по некоторым районам Узбекистана составлен прогнозный баланс грунтовых вод. Определено приращение элементов баланса грунтовых вод на прогнозируемый

период и оценено изменение естественных запасов подземных вод.

В пределах Китабо-Шахрисабзской котловины, где грунтовые воды в настоящее время имеют отрицательный солевой баланс, сумма приходных статей регионального баланса увеличится с 7,6 до 29,9 м³/сек, т. е. почти в 4 раза. В расходной части баланса дренажный сток составит 27 м³/сек, что на 21,4 м³/сек больше, чем в настоящее время. Испарение грунтовых вод составит 3 м³/сек. В этом районе ухудшения мелиоративного состояния орошаемых земель не ожидается. Солевой баланс грунтовых вод, как и прежде, останется отрицательным. Естественные запасы подземных вод увеличатся с 10,1 до 29,9 м³/сек.

В Голодной степи, где смешанный солевой баланс, инфильтрация оросительных вод достигнет 152,8 м³/сек. В современных условиях она равна 60,2 м³/сек. Сумма расходных статей баланса грунтовых вод увеличится в 2,5 раза и составит 163,1 м³/сек.

В Каршинской степи в современных условиях происходит соленакопление в грунтовых водах и почвогрунтах зоны аэрации с интенсивностью 536,2 тыс. т/год. В будущем соленакопление, вероятно, усилится, поскольку фильтрационные свойства пород зоны аэрации и грунтовых вод очень низкие 0,1—2 м/сутки. Породы представлены суглинками, супесями с прослойками тонкозернистых песков. В сумме расходных статей баланса грунтовых вод (38,3 м³/сек) испарение составит 65%, дренажный сток —32%. Подземный сток (0,07 м³/сек) как рассоляющий фактор не представляет практического интереса.

Для более глубокого изучения направленности солевого процесса, а также обоснования интенсивности работы искусственного дренажа рекомендуется схема районирования орошаемых территорий на основе количественных показателей водно-солевого баланса (табл. 23). Предлагаемая схема районирования позволяет оценить интенсивность засоления (рассоления) орошаемых территорий и правильно и целеустремленно наметить мелиоративные мероприятия.

Таблица 23

Схема районирования орошаемых территорий по направленности солевого баланса для мелиоративных целей

Область	Район (категория земель)	Направленность солевого баланса		Район возможного распространения
		в естественных условиях	в условиях орошения	
Развития засоления	Устойчиво-глубокого засоления	Солевой баланс положительный Сумма приходных статей баланса значительно больше, чем расходных (Спр ≫ Ср). Тип засоления в основном хлоридно-сульфатный	Солевой баланс положительный (Спр>Ср). В первые годы орошения может произойти опреснение верхней зоны грунтовых вод, в последующие годы будет происходить соленакопление по всей толще грунтовых вод и зоны аэрации. Тип засоления не меняется	Приморские и субаэральные дельты, сложенные слабопроницаемыми суглинками, супесями с прослойками песков. Подземный сток не обеспечен, грунтовые воды высокоминерализованные
	Неустойчиво-глубокого засоления	Солевой баланс положительный Сумма приходных статей баланса превышает расходные на незначительную величину (Спр>Ср). Тип засоления в основном сульфатно-натриево-магниевый	Солевой баланс положительный (Спр>Ср). В первые годы орошения происходит опреснение верхней части грунтовых вод. Тип засоления — гидрокарбонатно-сульфатный	Средние и нижние части конусов выноса и межконусные понижения. Водосодержащие породы представлены суглинками, супесями, подстилаемыми песками, гравием. Грунтовые воды слабоминерализованные.
	Устойчиво-неглубокого засоления	Солевой баланс положительный (Спр>Ср). Тип засоления сульфатный и сульфатно-хлоридный	Солевой баланс положительный (Спр>Ср). В региональном плане происходит заметное соленакопление за счет солей, переносимых ирригационными водами, однако в первые годы будет происходить вымыв солей из зоны аэрации в грунтовый поток. В последующем может произойти вторичное засоление земель.	Дельты рек, сложенные суглинками и супесями, подстилаемыми песками. Минерализация грунтовых вод высокая

Область	Район (категория земель)	Направленность солевого баланса		Район возможного распространения
		в естественных условиях	в условиях орошения	
Развития засоления	Неустойчиво-неглубокого засоления	Солевой баланс в течение года неустойчивый (Спр ≦ Ср). Зимой солевой баланс отрицательный, летом — положительный. Тип засоления сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный	Солевой баланс положительный. (Спр > Ср). Сумма приходных статей баланса превышает расходные на незначительную величину. Тип засоления — гидрокарбонатно - сульфатный	Предгорные шлейфы межгорных впадин и краевых понижений, сложенные переслаивающимися суглинками, супесями, песками и гравием. Грунтовые воды слабосолоноватые
Развития рассоления	Устойчиво-глубокого рассоления	Солевой баланс отрицательный. (Спр < Ср). Тип засоления гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый, гидрокарбонатно-кальциево-магниевый	Солевой баланс отрицательный (Спр < Ср). Тип засоления гидрокарбонатно-сульфатный.	Верхние части конусов выноса, долины рек, сложенные мощными песчано-галечниковыми отложениями, с прослойками суглинков и супесей. Грунтовые воды пресные из-за обеспеченности подземного стока.
	Неустойчиво-глубокого рассоления		Солевой баланс неустойчивый (Ср ≦ Спр). При длительном орошении может развиваться вторичное засоление земель. Тип засоления сульфатный, сульфатно-натриевый.	Средние и нижние части конусов выноса, межконусные понижения, сложенные суглинками, супесями с прослойками песков и галечников. Подземный сток слабо обеспечен, в связи с чем при орошении наблюдается подъем уровня слабоминерализованных грунтовых вод

Продолжение табл. 23

Область	Район (категория земель)	Направленность солевого баланса		Район возможного распространения
		в естественных условиях	в условиях орошения	
Развития рассоления	Устойчиво-неглубокого рассоления	—	Солевой баланс неустойчивый (Ср=Спр). Тип засоления — сульфатный, сульфатно-хлоридный. При длительном орошении может развиваться вторичное засоление земель	Дельты рек, сложенные суглинками, супесями, подстилаемыми песками. При орошении уровни слабоминерализованных грунтовых вод поднимаются
	Неустойчиво-неглубокого рассоления	—	Солевой баланс неустойчивый (Ср ≦ Спр). При орошении может развиваться вторичное засоление земель. Тип засоления сульфатно-хлоридный, хлоридно-сульфатный, натриевый	Предгорные равнины межгорных впадин, где подземный сток слабо обеспечен. При орошении наблюдается подъем уровня слабоминерализованных грунтовых вод
Со стабильным гидрохимическим режимом		Солевой баланс стабильный (Спр=Ср). Сумма приходных статей баланса равна сумме расходных. Тип засоления от гидрокарбонатного до хлоридного	Солевой баланс положительный (Спр>Ср). При длительном орошении может развиваться вторичное засоление земель. Тип засоления от гидрокарбонатного до хлоридного	Краевые части межгорных впадин, где в силу естественного глубокого залегания грунтовых вод значительных подъемов уровня не наблюдается

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ БАЛАНСА ГРУНТОВЫХ ВОД

Краткий обзор существующих методов

В настоящее время для ликвидации засоления земель применяется комплекс мелиоративных мероприятий, требующих больших капиталовложений. Мелиоративный эффект достигается при уменьшении испарения грунтовых вод и выноса солей путем увеличения дренированности территории.

Изучение испарения грунтовых вод представляет большой интерес при установлении режима орошения и регулировании влагооборота на орошаемых территориях. Питание большинства растений минеральными веществами осуществляется посредством транспирации, т. е. испарением воды, проходящей через клетки растений. Поэтому для установления оптимального режима влажности почв для нормального развития растений и формирования урожая необходимо определение роли испарения в процессе развития растений.

Большое внимание уделялось вопросам регулирования испарения грунтовых вод для увеличения водообеспеченности территорий. Методике исследования и количественного определения испарения с деятельной поверхности посвящены работы А. М. Алпатьева (1954), У. М. Ахмадсафина (1950), Н. И. Биндемана (1956), М. И. Будыко (1948), А. И. Будаговского (1961), А. Р. Константинова (1963), А. С. Кузина (1940), А. Н. Костякова (1960), М. М. Крылова (1959), А. С. Конторшинова (1963), Д. М. Кац (1963), Н. А. Кенесарина (1959), М. И. Каплинского (1960), В. С. Конькова (1948), А. В. Лебедева (1957), В. М. Легостаева (1959), А. А. Роде (1952), А. А. Скворцова (1947), Л. Р .Струзера (1952), А. Ф. Сляднова (1961), А. В. Урываева (1953), Н. Н. Ходжибаева (1956), Д. И. Шашко (1933), Р. Р. Шредера (1925) и др.

При их изучении выявлено пять различных методов определения испарения. Первый заключается в определении зависимости испарения от температуры и дефицита влажности воздуха, глубины залегания уровня грунтовых вод, влажности зоны аэрации и т. д. На основании экспериментальных исследований выведены эмпирические формулы, позволяющие легко установить величину испарения с каких-либо территорий. Этот подход рассматривается нами как эмпирический.

Второй — балансовый, более надежен при правильном и точном определении составляющих балансовое уравнение.

Третий — определение испарения методом изучения теплового баланса и турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы. Им устанавливается суммарное испарение с деятельной поверхности, т. е. испарение поверхностью почвы, транспирация растительностью и испарение атмосферных осадков, задержанных на кронах растений.

Четвертый, называемый условно «транспирационным», позволяет определить расход влаги путем транспирации растениями за период их произрастания. Наиболее распространен метод срезанных объектов.

Пятый — лизиметрический, устанавливает закономерности формирования испарения и взаимосвязи грунтовых вод с деятельной поверхностью: процессы передвижения влаги и солей в зоне аэрации, влияние грунтовых вод на физиологическое развитие растений, скорость капиллярного передвижения и др. Кроме того, этим методом определяется инфильтрационное питание грунтовых вод за счет оросительных вод и атмосферных осадков. Общее для всех методов — стремление разрешить проблему регулирования испарения в целях сохранения плодородия почв и увеличения урожайности сельскохозяйственных культур.

Эмпирический метод сформировался после многочисленных опытов и теоретических проработок для установления зависимости испарения от различных факторов. Главное из них — водопотребление и физиологическое развитие растений, температура, дефицит влажности воздуха, глубина залегания уровня грунтовых вод и атмосферные осадки. Эти факторы в различных климатических зонах имеют неодинаковую степень влияния на процесс испарения.

А. М. Алпатьев, изучая связь испарения с дефицитом влажности воздуха, вывел формулу для вычисления суммарного испарения за вегетационный период с орошаемых территорий.

$$E = 0{,}65 \cdot \sum d_1,$$

где E — испарение поверхностью почвы и транспирация растительностью за вегетационный период, м³/га;

$\sum d_1$ — сумма дефицита влажности воздуха за вегетационный период.

По Н. А. Костякову, на участках с оголенной почвой ход испарения повторяет кривую температуры и дефицита влажности воздуха. Для этих участков при определении величины испарения он рекомендует пользоваться формулой:

$$E = \alpha \cdot t \left(1 - \frac{Z}{100}\right),$$

где t — температура воздуха, °С.

Z — относительная влажность воздуха, мб;

α — эмпирический коэффициент, зависящий от относительной влажности и температуры воздуха, изменяется от 0,6 до 1,1.

Другая формула выведена на основании анализа связи испарения с глубиной залегания уровня грунтовых вод и максимально возможного испарения с водной поверхности. Для участков с неглубоким залеганием уровня грунтовых вод независимо от вида произрастающего растения испарение с деятельной поверхности вычисляется решением соотношения

$$q = q_0 \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta_0}\right) n,$$

где q — интенсивность испарения при глубине стояния уровня грунтовых вод Δ, м³/час;

Δ_0 — критическая глубина испарения грунтовых вод, м;

n — показатель степени ($1 < n < 3$), обычно $\simeq 2$;

q_0 — интенсивность испарения с поверхности при очень высоком стоянии уровня грунтовых вод, равная примерно испарению с водной поверхности, м³/час. Для его определения можно использовать формулу В. Д. Зайкова, полученную при проработках большого числа наблюдений в испарительных бассейнах:

$$v_в = 0{,}2\, n\, (l_0 - l_{200})\, (1 + 0{,}85 w_{100});$$

где $v_в$ — сумма испарения за расчетный период, мм;

l_0 — среднемесячная упругость насыщенного пара, рассчитанная по температуре поверхности воды, мм;

l_{200} — упругость водяного пара на высоте 200 см от поверхности воды, мм;

w_{100} — среднемесячная скорость ветра на высоте 100 см, м/сек;

n — число дней расчетного периода, сутки.

В практике метеорологических исследований широко применяются расчетные формулы И. А. Шарова для определения потерь влаги на испарение с сельскохозяйственных полей

$$M = l \cdot d,$$

где l — модуль испарения с единицы поверхности на 10°С;

d — среднесуточный дефицит влажности воздуха, равный разности температур сухого и смоченного термометра.

По И. А. Шарову, испарение с орошаемых территорий (E) складывается из испарений с поливных и неполивных площадей, определяемых в зависимости от их размеров.

$$E = \frac{\Sigma t l_1 w_п + \Sigma t l_2 w_{нп}}{w_п + w_{нп}},$$

где t — среднесуточная температура воздуха на расчетный период, °С;

$w_п$ — площадь поливного участка, га;

$w_{нп}$ — площадь неполивного участка, га;

l_1 — модуль испарения поливных площадей на 10°С;

l_2 — модуль испарения неполивных площадей на 10°С.

Модуль l_1 для участков с хорошей урожайностью сельскохозяйственных культур 2,0—2,2, средний 1,8—2,0 и низкий 1,4—1,6. Для участков, затопленных водой, $l_2 = 2{,}5$—$3{,}0$.

Испарение со свободной неорошаемой площади вычисляется по соотношению

$$N = \frac{1}{N_6} \sum [t(2 - z) - 4]\, w_d,$$

где t — среднесуточная температура воздуха;

z — глубина до грунтовых вод, м;

w_d — площади с глубиной залегания уровня грунтовых вод z, га.

Для этих условий, в дни выпадения осадков, он предлагает зависимость для определения испарения

$$E = \sum (2t - 4),$$

где t — температура воздуха, °С.

Д. И. Шашко (1938), анализируя многочисленные экспериментальные материалы, предложил следующую зависимость для определения расхода влаги на транспирацию растениями:

$$Vt = \mu (E - e) m,$$

где Vt — транспирация, мм слоя воды или м³/га сутки;

μ — диффузный гидромодуль транспирации, равный частному от деления суточного транспирационного коэффициента на среднесуточный дефицит влажности воздуха. Транспирационный коэффициент — количество воды, затрачиваемой для образования одной весовой абсолютно сухой массы урожая;

m — абсолютно сухая растительная масса, накопленная за данные сутки;

$(E - e)$ — среднесуточный дефицит влажности воздуха, равный разности между максимальной упругостью водяных паров при данной температуре и абсолютной влажности воздуха.

Величина μ определяется эмпирической формулой

$$\mu = a \cdot x^{-e},$$

здесь a, e — постоянные коэффициенты, определяемые способом наименьших квадратов на основании ряда наблюдений за транспирацией.

В практике исследования испарения существует еще множество эмпирических формул, выведенных для косвенного определения величины испарения. Эти формулы широко применяются в метеорологии и гидрологии.

Метод теплового баланса заключается в том, что сумма поступающего к деятельной поверхности и уходящего от нее тепла должна регулироваться, т. е. приход-расход тепла, полученный от радиации (радиационный баланс), должен уравновешиваться приходом-расходом тепла, идущего на теплообмен с почвой и воздухом, испарение и конденсацию

$$B = P + L + V,$$

где B — радиационный баланс деятельной поверхности;

P — поток тепла в почву;

L — турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы;
V — тепло, затрачиваемое на испарение или получаемое от конденсации.

По этому методу, как отмечено выше, на опытном участке «Малек», проводились экспериментальные исследования для определения суммарного испарения хлопкового поля.

Балансовый метод. В 1911 г. Э. М. Олдекоп установил связь между компонентами уравнения водного баланса. Для того времени он достаточно обосновал зависимость испарения от атмосферных осадков и максимально возможного испарения в данных географических условиях. Физический смысл уравнения Э. М. Олдекопа заключается в том, что на большой территории, ограниченной водоразделами, за многолетний период выпавшие атмосферные осадки численно равняются подземному (поверхностному) стоку и испарению, т. е.

$$A=(П_1+П)+И,$$

где A — атмосферные осадки, мм;
$П_1$ — поверхностный сток, мм;
$П$ — подземный сток, мм;
$И$ — суммарное испарение, мм.

Для зоны активного водообмена почвы, часто совпадающей с корнеобитаемой зоной, уравнение водного баланса имеет вид

$$Q_п + E + Q_н = \frac{dvp}{dt},$$

где $Q_п$ — интенсивность впитывания воды в почву;
E — интенсивность испарения;
$Q_н$ — интенсивность водообмена между корнеобитаемой зоной и нижележащими слоями почвы;
$\frac{dvp}{dt}$ — скорость изменения влагосодержания корнеобитаемой зоны.

К аналогичному выводу пришел французский исследователь Л. Тюрк (1958). В уравнение Э. М. Олдекопа он вводит элемент изменения влагосодержания речного бассейна

$$E = P - D + \frac{r_i - r_f}{n},$$

где P — слой атмосферных осадков, полученных бассейном за год;
D — сток за тот же период;
r_f — влагосодержание бассейна в конце периода;
r_i — то же в начале периода;
n — период наблюдения.

Автор уравнения отмечает, что если период наблюдений n составляет ряд лет, то величиной $\frac{r_i - r_f}{n}$ можно пренебречь.

Для зоны активного влагообмена с определенной мощностью суммарное испарение можно определить по уравнению водного баланса Л. Р. Струвера и Н. П. Русина.

$$E = \left(W_1^P - W_2^P\right) + X - C - V,$$

здесь E — суммарное испарение за рассматриваемый период;
W_1^P, W_2^P — влагосодержание почвы мощностью P соответственно в начале и конце периода;
X — сумма осадков за рассматриваемый период;
C — поверхностный сток;
V — влагообмен почвы мощностью P с нижележащими слоями за этот же период.

Для определения испарения с больших территорий, занятых различными сельскохозяйственными культурами, независимо от наличия естественных водораздельных границ, можно пользоваться балансовыми уравнениями А. Н. Костякова, М. М. Крылова, Г. Н. Каменского, А. В. Лебедева, Н. Н. Роговской, А. Ф. Сляднева, И. А. Шарова.

Уравнение А. И. Костякова

$$E = \Delta H\mu - [M + S + P + (V - V_0) + K + (W - W_0) + (q - Q_t)]$$

где M — количество воды, поданной на орошаемые поля;
S — количество воды, поступающей из оросительных каналов путем фильтрации;
P — атмосферные осадки, проникающие в почву (сюда же включается конденсация водяных паров);
V — избыточные поверхностные воды, поступающие в системы и задерживающиеся в них из-за неурегулированного водозабора, затопления во время паводков, прорывов каналов и дамб, разлива сбросных вод;
V_0 — сток избыточных не поглощаемых почвой поверхностных вод за пределы орошаемого массива и сброс воды за его пределы;
W — запас влаги в почвогрунтах орошаемого массива выше уровня грунтовых вод в начале опыта;
W_0 — запас влаги в той же толще почвогрунтов, который удерживается без стекания в грунтовые воды;
q — подземный приток грунтовых вод извне;
$Q_т$ — отток грунтовых вод за пределы орошаемого массива;
K — влага, поступающая в почву с поверхности грунтовых вод при их неглубоком залегании;
μ — коэффициент свободной пористости грунта;
ΔH — изменение уровня грунтовых вод на участке за расчетный период.

Обстоятельная формула для определения испарения балансовым методом — выражение М. М. Крылова

$$E=(B_m-B_n)\cdot\Delta h-\left[x_f+\frac{(f_k+f_n)+I_b}{10W}+\sum z_1+(W_2-W_1)\right],$$

здесь B_m — полная влагоемкость грунта в зоне над уровнем грунтовых вод;

B_n — полная потенциальная влагоемкость в той же зоне;

x_f — атмосферные осадки, просочившиеся до грунтовых вод;

f_n — часть поливных вод, просочившихся до грунтовых вод;

f_k — та же фильтрационных вод из каналов;

I_b — расход выклинивающихся грунтовых вод из участков;

$\sum z_1$ — общее количество конденсационных вод;

W_2 — отток подземных вод за пределы участка;

W_1 — приток подземных вод в пределы участка;

Δh — изменение уровня грунтовых вод на участке W.

При наличии данных о коэффициенте фильтрации и мощности водоносного горизонта, а также трех наблюдательных пунктов по грунтовому потоку более точное значение испарения с единицы площади потока можно определить уравнением А. В. Лебедева

$$E=\frac{\delta\cdot\Delta H}{\Delta t}-\frac{q_1-q_2}{\Delta x},$$

где ΔH — изменение уровня воды в средней скважине по потоку грунтовых вод, м;

δ — коэффициент водоотдачи;

q_1 — единичный расход подземного притока, м³/сутки;

q_2 — единичный расход подземного оттока, м³/сутки;

Δx — протяженность единицы выделенного элемента потока, м;

Δt — расчетный период.

Условие для определения испарения с уровня грунтовых вод балансовым уравнением А. В. Лебедева — отсутствие инфильтрации сверху.

Наиболее распространенные методы — срезанных объектов лабораторно-вегетационный, полевой вегетационный, лизиметрический, полевой объемный, хлор-кобальтовой пробы с помощью облегченных транспирометров Г. А. Евтушенко, фотометрический.

Метод срезанных объектов основан на определении потерь воды на транспирацию за несколько минут одним или несколькими срезанными листьями растений. Определение транспирации производится путем повторного взвешивания листьев (одно сразу после срезания, второе и последующие через строго определенные отрезки времени). О расходе воды на транспирацию судят по изменению веса листьев за время опыта.

При выборе растений для определения расхода влаги на транспирацию необходимо обратить особое внимание на однородность густоты стояния растений. Выбранный куст растения по внешнему виду должен отвечать среднему из всех растений, развивающихся на исследуемом участке. Отдельно стоящие растения не приемлемы для проведения опыта, так они под влиянием температуры воздуха, ветра и солнечной радиации испаряют больше воды.

Метод хлор-кобальтовой пробы основан на учете транспирируемой листом воды путем взвешивания впитывающей ее хлор-кобальтовой бумажки.

Фотометрический метод — определение транспирации растениями в специальных измерительных сосудах — фотометрах. Сосуд выбирается в зависимости от объема корневой системы растений, из него выкачивается воздух.

Лабораторно-вегетационный метод основан на определении величины транспирации путем взвешивания субстрата с растением, помещенным в специальные сосуды. Сосуд изготовляется из стекла, стали, керамики. Для предотвращения испарения влаги с поверхности почвы его закрывают.

Лизиметрический метод. Прежде чем перейти к изложению данного вопроса, необходимо внести ясность в терминологию «испарение грунтовых вод». Испарение грунтовых вод — процесс, при котором определяется расход влаги на испарение с уровня грунтовых вод при естественном его колебании. В лизиметрах — искусственно созданные условия. Доливом воды через питающую систему поддерживается уровень воды лизиметра на постоянной отметке и тем самым создаются благоприятные условия для максимального насыщения грунта ниже этой отметки. Снижение или подъем уровня воды в лизиметре не допускается. Поэтому расход влаги на испарение из лизиметра следовало называть «испаряемостью» грунтовых вод при определенных глубинах их залегания (0,5, 1, 1,5, 2 м и т. д. от поверхности).

По литературным данным, испарение воды в лизиметре называют испарением грунтовых вод. Мы в данной работе придерживаемся этой терминологии.

Для определения испарения с деятельной поверхности широко применяются испарители — лизиметры, конструкции и принцип работы которых зависит от поставленных задач.

За последнее столетие русскими учеными М. М. Крыловым, В. М. Поповым, Б. Аполовым, М. С. Алимовым, М. Лукашиным, А. А. Роде, А. В. Лебедевым, К. Я. Кожановым, Нифонтовым, А. Ф. Слядневым, Ф. Доранто, И. А. Рыкачевым, Б. С. Коньковым, В. М. Легостаевым, В. А. Урываевым и др., а также зарубежными Миллером, Д. Острамеки, Сандерсоном, Дей, Г. Ренковистом, Рамдасом, Тюрком предложены различные лизиметры-испарители.

Наиболее древний, примененный в 1874—1875 гг. в г. Нукусе,— испаритель Ф. Доранто, представляющий круглый металли-

ческий сосуд высотой 35 см, площадью 1000 см². Фильтром монолита служил битый (размельченный) кирпич, на который насыпался грунт или песок. Изучение испарения проводилось при полном насыщении монолита (залитого доверху водой).

Позднее М. А. Рыкачев предложил испаритель размером 25×40 см, площадью 1 000 см², состоящий из двух жестяных сосудов. Внутренний ящик высотой 30 см (снизу дырчатый) вставляется в наружный. Он отличается от испарителя Ф. Доранто принципом действия и методикой наблюдений. По испарителю М. Рыкачева испарение определяется путем частых взвешиваний внутреннего ящика с грунтом. Наружный ящик изолируют от окружающей среды.

В практике гидрогеологических исследований наиболее распространены лизиметры М. С. Алимова, М. М. Крылова, А. В. Лебедева, А. А. Роде, А. Ф. Сляднева. М. М. Крылов в 1959 г. предложил два вида лизиметров. Первый площадью испарения 1 000 см² представляет металлический цилиндр (из котельного железа), устанавливаемый в другой более низкий и широкий, заполненный отсортированным гравием (рис. 12). В верхний цилиндр помещается монолит почвогрунта с естественной структурой. Нижний имеет питательную трубу (выведенную на дневную поверхность), через которую доливается вода при снижении уровня воды в лизиметре в результате испарения и отливается при инфильтрации. Диаметр питательной трубы 18—20 мм.

Испарение вычисляется по количеству воды, долитой через питательную трубку, инфильтрация (атмосферных осадков и поливных вод) — по отлитой. Основной недостаток круглого лизиметра М. М. Крылова — относительно малая площадь (0,1 м²). Термический режим монолита нарушается в связи с перегреванием верхних кромок лизиметра.

При выращивании сельскохозяйственных культур в этом лизиметре корневая система растений развивается не так, как в естественных условиях. Наблюдается скучивание корней, в результате чего полученные данные о испарении завышены. Более совершенным является большой четырехугольный лизиметр М. М. Крылова с поперечным сечением 1×2 м. Высота лизиметра 1—3 м. Непроницаемые стенки изготавливаются из железобетона. Внутри системы помещается грунт с нарушенной структурой (Крылов, 1959).

Лизиметр А. Ф. Сляднева (рис. 13), изготавливаемый из котельного железа, имеет прямоугольное сечение 0,7×1,2 м, высотой 2—3—5 м. Верхние края его заделываются с невзрыхленным грунтом или ниже его. Дно бака устанавливается на 0,5—0,8 м ниже минимального положения уровня грунтовых вод. Монолит питается водой из гравийной подстилки, расположенной на дне лизиметра. Бак соединен с измерительной трубкой, в которой устанавливается механизм регулирования уровня. Измерительная

трубка сверху закрывается герметически крышкой. Вблизи лизиметра оборудуется скважина для наблюдения за грунтовыми водами. Лизиметр А. Ф. Сляднева в отличие от лизиметра М. М. Крылова позволяет производить обработку сельскохозяйственных культур так же, как в естественных условиях. Наблюдения проводятся по естественному ходу колебания уровня грунтовых вод, в результате чего создаются условия для воздухообмена.

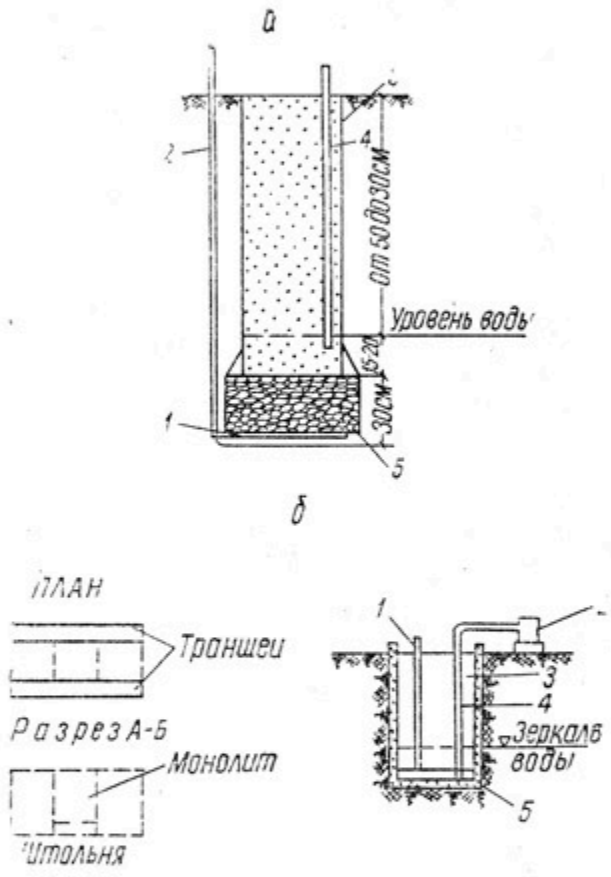

Рис. 12. Лизиметры для изучения испарения и инфильтрации (по М. М. Крылову)

а—металлический лизиметр площадью 1000 см²: *1*—перфорированная труба, *2*—питательная труба, *3*—цилиндр, *4*—наблюдательная скважина, *d*=12—15 мм, *5*—гравийный фильтр: *б*—большой лизиметр на бетонном основании сечением 1,0×2,0 м: *1*—наблюдательная скважина, *2*—бачок для воды, *3*—монолит, *4*—питательная скважина, *5*—бетонные стенки.

Этим лизиметром можно определять подземный приток и отток грунтовых вод. Недостатком лизиметра А. Ф. Сляднева является то, что он заряжается грунтом нарушенной структуры. Для составления баланса воды лизиметра необходима непрерывная регистрация динамики влаги в зоне аэрации.

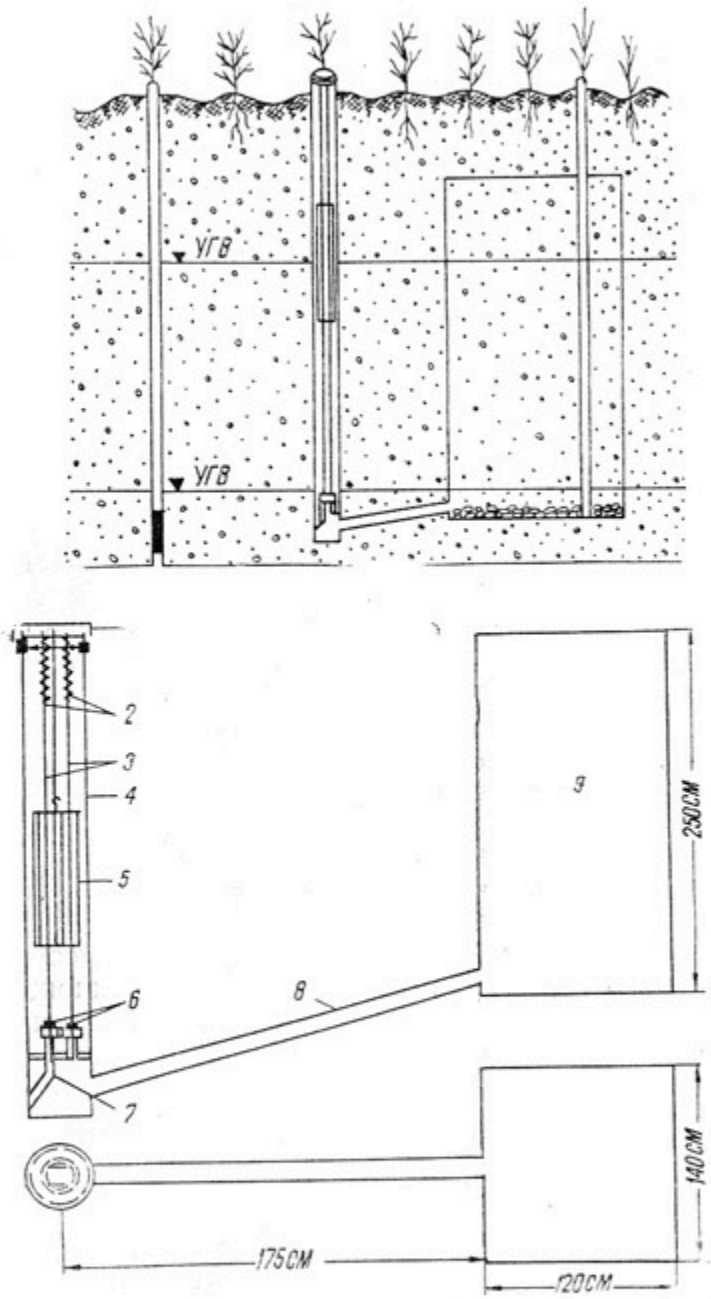

Рис. 13. Лизиметр А. Ф. Сляднева.

1—крышка, *2*—пружины, *3*—штанги к клапанам, *4*—трубка измерительная, *5*—поплавок, *6*—клапаны, *7*—трубка приемная, *8*—соединительная трубка, *9*—бак лизиметра.

В Подмосковном стационаре в 1959 г. А. В. Лебедевым (1961) сооружена лизиметрическая установка, подобная А. Роде. Она состоит из двух ярусов лизиметра. Верхняя пара устанавливается заподлицо с поверхностью земли, нижняя — на глубине 2,7 м на высоте естественного уровня грунтовых вод.

Лизиметры изготавливаются из труб диаметром 254 мм, высотой 1,0 м. Нижняя часть лизиметра (непроницаемое дно) заполняется отсортированным гравием. Он заряжается грунтом (взятым с места установки), который трамбуется и увлажняется снизу.

Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод определяется измерительной аппаратурой, состоящей из сосуда Мариота, мерного цилиндра, питающей трубки с воронкой и пьезометра для наблюдения за уровнем воды в лизиметре. Она устанавливается в будке, построенной на бетонном основании. На дне будки закладывается колодец для наблюдения за колебанием уровня грунтовых вод, которое осуществляется с помощью уровнемера с недельным заводом. С помощью верхней пары лизиметров определяется расход воды на испарение, нижней — инфильтрационное питание грунтовых вод. Более совершенная конструкция лизиметра предложена А. В. Лебедевым (1961) в 1958 г. Он предназначен для изучения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод при естественном колебании их уровня, а также для определения местного подземного притока и оттока.

Испаритель Д. М. Остромеки по принципу работы аналогичен почвенным испарителям ГГИ—500 и ГГИ—51. Лизиметр с монолитом устанавливается на платформе, позволяющей передвигаться ему по рельсам на весы. Площадь лизиметра 1,0 м^2, высота монолита 1,5 м. Уровень воды поддерживается на постоянной отметке с помощью металлической трубы, внутри которой установлены водосливные трубки.

Лизиметр Сандерсона прост по конструкции. Высота с гравийной подушкой в нижней части составляет 0,75 м, площадь 1,25 м^2. Сверху подушки насыпается песок. Уровень воды поддерживается на постоянной отметке при помощи регулятора. Инфильтрационные воды сливаются в сосуд через сливную трубку, работающую по принципу сообщающихся сосудов. Регулятор соединяется с лизиметром соединительной трубкой. Причем он устанавливается ниже поверхности на уровне воды лизиметра. В камеру регулирования вода подастся по трубке из питательного бака, устанавливаемого на поверхности. Количество поданной воды фиксируется по пьезометру, сообщающемуся с питательным баком.

Почвенный сосуд Рамдас представляет цилиндр с почвой. Уровень воды поддерживается на постоянной отметке с помощью герметически закрытого сосуда. Сосуд устанавливается вплотную в стенке в нижней части лизиметра.

Лизиметр А. Тюрка — цилиндр с отводной трубкой в нижней части. Почвенный монолит снизу имеет гравийную подушку.

Площадь лизиметра 1,0 м². Баланс атмосферной влаги вычисляется с учетом слившейся воды из отводной трубы. Слив воды А. Тюрк называет дренажом лизиметра.

Классификация лизиметров

Кроме рассмотренных выше, имеются лизиметры, отличающиеся по конструкции и принципу действия. Но все они предназначены для изучения накопления или убыли грунтовых вод путем вертикального водообмена. В отдельных конструкциях (А. В. Лебедев, А. Ф. Сляднев), поддерживая уровень воды подобно уровню грунтовых вод, можно определить местный подземный сток. Однако методика определения элементов баланса грунтовых вод в различных лизиметрах неодинакова. Кроме того, различна методика их установки, условия определения испарения и инфильтрации.

На основании результатов исследований на опытном участке «Малек» и литературных данных мы разработали классификацию лизиметров применительно к районам орошаемого земледелия (табл. 24). Выделили группу лизиметров по способу учета испарения, типы — по уровню воды в лизиметре и виды — по условиям определения элементов баланса.

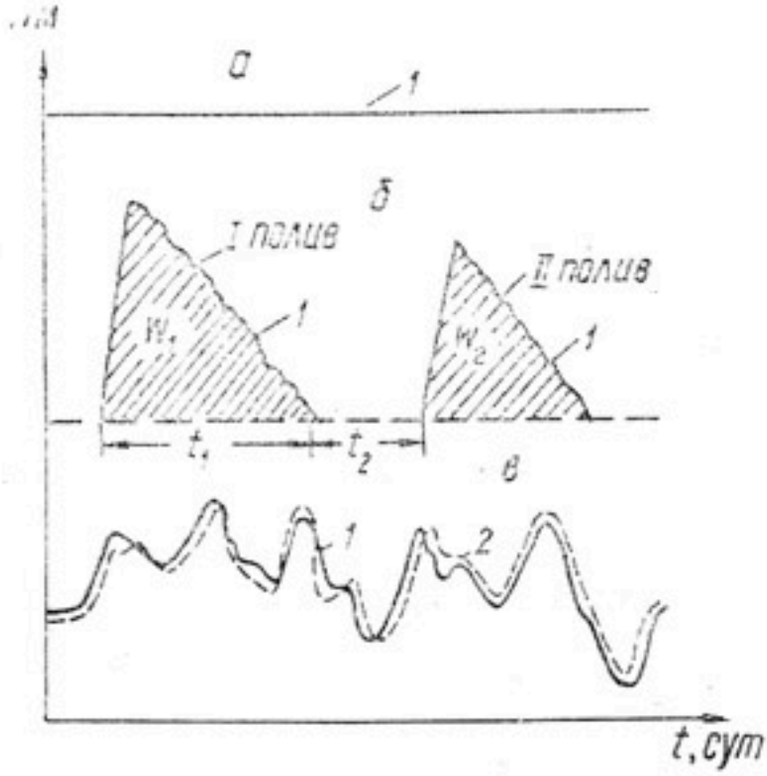

Рис. 14. График режима уровня воды в лизиметре.

1—уровень воды в лизиметре, *2*—в наблюдательной скважине; изменение уровня воды в лизиметре с постоянным уровнем (а), с искусственно-переменным (б), с естественно-переменным (в)

Лизиметры, применяемые в настоящее время для изучения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод, а также подземного притока и оттока, подразделяются на емкостные и весовые группы. В емкостных лизиметрах динамика баланса грунтовых вод изучается по долитой и отлитой воде. Весовыми лизиметрами элементы баланса определяются в разности весовых единиц первого и второго взвешивания. Емкостные лизиметры по залеганию уровня воды в них подразделяются на три типа (рис. 14): 1) с постоянным уровнем, 2) с искусственно-переменным, 3) с естественно-переменным.

Лизиметрами первого типа испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод изучается при постоянном уровне воды (ме-

Таблица 24

Классификация лизиметров применительно к районам орошаемого земледелия

Способ определен. элемента баланса	Тип по уровню воды	Структура грунта	Глубина залегания уровня грунтовых вод, м	Расположение кромки, см	Определение накопления поверхностного стока	Определение подземного стока	Испаряющая поверхность	Рекомендуемая площадь лизиметра, м²
Емкостный	Постоянный	Ненарушенная	От 0,5 до 3,5	Выше поверхности земли на 5—10	Возможно	Невозможно	Сельскохозяйственная растительность	1,0—2,0
				На отметке поверхности земли	Невозможно			
			Больше 3,5	Подпахотные Ниже пахотного слоя			Естественная растительность (травы)	1,0
							Почва без растительности	1,0
	Искусственно-переменный		Постоянная от 0,5 до 3,5 с подъемом уровня в период инфильтрации	Выше поверхности земли на 5—10 см	Возможно		Сельскохозяйственная растительность	1,0 2,0
				На поверхности земли	Невозможно	Возможно	Естественная растительность (травы)	1,0
				Подпахотные	Невозможно		Почва без растительности	2,0
	Естественно-переменный	Нарушенная	Колеблющаяся аналогично уровню грунтовых вод	Выше поверхности земли на 5—10	Возможно	Возможно	Сельскохозяйственная растительность	1,0—2,0
		Ненарушенная		На поверхности земли	Невозможно	Возможно	Естественая растительность (травы)	1,0
							Почва без растительности	1,0

Продолжение табл. 24

Способ определен. элемента баланса	Тип по уровню воды	Структура грунта	Глубина залегания уровня грунтовых вод, м	Расположение кромки, см	Определение накопления поверхностного стока	Определение подземного стока	Испаряющая поверхность	Рекомендуемая площадь лизиметра, м²
Емкостный	Естественно-переменный	Ненарушенная	Колеблющаяся, аналогично уровню грунтовых вод	Подпахотные Ниже пахотного слоя	Невозможно	Невозможно	Сельскохозяйственная растительность Естественная растительность (травы) Почва без растительности	1,0 2,0 1,0 1,0
Весовой	Постоянный	Нарушенная	От 0,5 до 3,5	На поверхности земли				

тод М. М. Крылова), который в течение опыта поддерживается на глубине от поверхности 0,5, 1,0, 2,0, 2,5, 3,0 м и более.

Лизиметры с уровнем воды более 3,0 м устанавливаются в районах с глубиной залегания уровня грунтовых вод 3—10 м, на участках, где необходимо определять расход грунтовых вод на транспирацию дикорастущей флорой и внутригрунтовое испарение.

Величина инфильтрации атмосферных осадков, поливных и промывных вод определяется откачкой, испарения — подолитой воде в лизиметр. Для определения накопления поверхностного стока атмосферных осадков, поливных и промывных вод кромку (верх) основного бака лизиметра необходимо установить на 5—10 см выше поверхности земли. Более удобный прибор для определения количества осадков, достигающих поверхности земли на хлопковых площадях,— рядковый дождемер А. Ф. Сляднева (1961). Кроме того, им можно определять величину осадков, задержанных растительным покровом, которые возвращаются в атмосферу при испарении.

В районах с необеспеченным подземным стоком атмосферные осадки выпадают главным образом в осенне-зимний и весенний периоды. Обычно в это время производятся промывные поливы. Для учета накопленных поверхностных вод лизиметрами необходимо знать величину подачи воды ($П_1$), расход промывной воды на пополнение запаса влаги зоны

аэрации (З), расход в грунтовые воды (Г) и расход на испарение (И), а также количество выпавших за промывной период осадков (А). Накопление поверхностных вод за расчетный период определяется по уравнению

$$Н = П_1 (З + Г + И) + А.$$

В период вегетации (с мая по октябрь) целесообразно применять лизиметры с кромкой на отметке поверхности земли. При этом уровень воды в лизиметре поддерживается на глубине 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 м ниже поверхности земли. За постоянную точку замера уровня следует принять один из углов кромки лизиметра.

Количество инфильтрационных вод равняется количеству воды, отлитой из инфильтрационной трубы, испаряющихся грунтовых вод — количеству воды, долитой в питательную трубу лизиметра.

Во время поливов при отсутствии атмосферных осадков часть поливной воды расходуется на испарение, транспирацию, пополнение запасов влаги зоны аэрации и большинство на питание грунтовых вод. За поливной период баланс влаги лизиметра вычисляется по уравнению

$$П = З + И + Г,$$

а количество инфильтрационных вод до грунтовых за единицу времени так:

$$Г = \frac{П - (З + И)}{\omega \cdot \Delta t},$$

где $П$ — поливные воды, поданные на единицу площади (ω), м³;
З — накопление запаса влаги в зоне аэрации за счет инфильтрации поливных вод, м³;
И — испарение поливных вод до проникновения их в грунтовые воды, м³.

При выпадении осадков поливные воды заменяются атмосферными осадками. Для балансовых расчетов большой интерес представляет дифференциация влаги, т. е. определение приходных и расходных элементов баланса лизиметра за гидрогеологический год. Для этого применяется уравнение вида

$$А + П + Д + Т = (Ф_а + Ф_п + Ф_д + Ф_р) + (О_а + О_р + О_п) + (И_а + И_п + И_д + И_р),$$

где А — атмосферные осадки, выпавшие на поверхность лизиметра, мм;
П — поливные воды, мм;
Д — вода, долитая в питательную трубу лизиметра, мм;
Т — промывные воды, мм;
$Ф_а$ — пополнение запаса влаги в зоне аэрации атмосферными осадками, мм;
$Ф_п$ — то же, поливными водами, мм;

$Ф_р$ — то же промывными водами, мм;
$Ф_д$ — то же из грунтовых вод путем вертикальной фильтрации, мм;
$О_а$ — инфильтрация атмосферных осадков до грунтовых вод, мм;
$О_п$ — то же поливных вод, мм;
$О_р$ — то же промывных вод, мм;
$И_а$ — испарение атмосферных осадков до проникновения в зону аэрации, мм;
$И_п$ — то же поливных вод, мм;
$И_р$ — то же промывных вод, мм;
$И_д$ — испарение поверхностью почвы долитой воды, мм.

Подпахотные лизиметры применяются для определения испарения с хлопкового поля, где обработка механизирована. По этим лизиметрам получают правильные результаты по испарению и инфильтрационному питанию грунтовых вод при непрерывной регистрации динамики влажности грунтов зоны аэрации.

Лизиметры с кромкой ниже пахотного слоя устанавливаются в районах с глубиной залегания уровня грунтовых вод более 3,5 м (нижняя пара лизиметрической установки А. А. Роде, 1960) для определения транспирации естественной растительностью и внутригрунтового испарения. В лизиметрах с отметкой кромки на поверхности пахотного слоя или ниже подпахотного невозможно определить накопление поверхностного стока атмосферных осадков, поливных и промывных вод, а также местный подземный приток и отток. Для установления местного подземного стока применяются лизиметры второго и третьего типов первой группы.

С помощью второго типа лизиметров испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод определяется, как у первого, но инфильтрационные воды из лизиметра не выкачиваются (метод Алимова, 1965). Снижение инфильтрационного бугра в результате испарения допускается до проектной отметки, т. е. до глубины 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 и 3,0 м от поверхности. После этого доливают воду (как в лизиметрах первой группы). Этим типом лизиметров определяют параметры для водно-балансовых расчетов:

а) величину подъема уровня грунтовых вод в результате инфильтрации (атмосферные осадки, поливные и промывные воды); б) скорость снижения инфильтрационного бугра под влиянием испарения; в) расчленение водопотребления растений на инфильтрационно-поливные воды за время t_1 с объемом W_1, W_2 и т. д., а также грунтовые за время t_2 с объемом, равным долитой воде через питательную трубку лизиметра; г) начало водопотребления растениями инфильтрационных и грунтовых вод: д) начало очередного полива или промежуток времени межполивного периода.

Для количественной оценки расхода инфильтрационных вод на испарение этим лизиметром необходимо знать водоотдачу монолита лизиметра по вертикали, а для переноса полученных дан-

ных в естественные условия — величину подземного притока и оттока, что определяется в основном лизиметрами третьего типа.

Следует подчеркнуть, что рассматриваемыми лизиметрами возможно определить подземный приток и отток при условии равномерного полива лизиметра и окружающего фона. В результате инфильтрации поливных вод уровни воды в лизиметре и наблюдательной скважине устанавливаются на отметке H_0 (рис. 15) за период наблюдения от t_0 до t_2 и t_3 в лизиметре и наблюдательной трубке на дополивной отметке H_3.

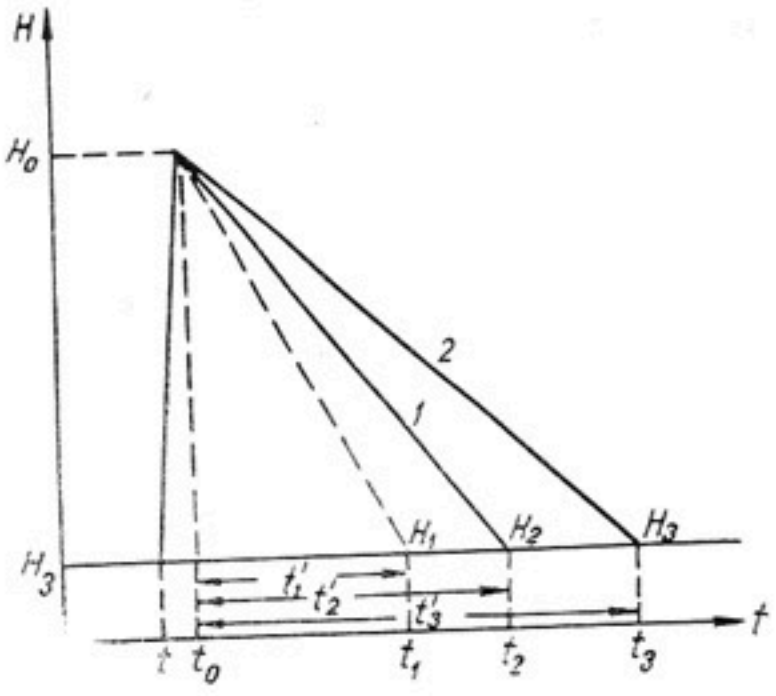

Рис. 15. Снижение уровня вод лизиметра (1) и наблюдательной скважины (2).

При подземном притоке уровень воды в наблюдательной скв. 2 снижается медленнее, чем в лизиметре 1, при оттоке наоборот. При подземном притоке (рис. 15)

$$\frac{H_0 - H_3}{\Delta t} > \frac{H_0 - H_3}{\Delta t_2}; \qquad \Delta t < \Delta t_2;$$

при оттоке

$$\frac{H_0 - H_3}{\Delta t_1} < \frac{H_0 - H_3}{\Delta t_3}; \qquad \Delta t_2 > \Delta t.$$

Для количественной оценки подземного притока и оттока описываемой группой лизиметров за период Δt предлагаются уравнения при подземном притоке

$$Q_1 = \frac{[(H_0 - H_3)\cdot\mu + И_е (H_0 - H_1)\mu]\, w}{\Delta t w_1} = \frac{(H_0 - H_2)\mu + (И_е - И_л)\, w}{\Delta t w},$$

при подземном оттоке

$$Q_2 = \frac{[(H_0 - H_1)\mu - (H_0 - H_2)\mu + И_е]\, w}{\Delta t w_1} = \frac{[(И_л - (H_0 - H_2)\mu + И_е]\, w}{\Delta t w_1},$$

где H_0 — отметка уровня воды в лизиметре и наблюдательной скважине в момент прекращения инфильтрации, м;

H_1, H_2 — то же, за время t, м;

H_3 — то же, за время t_2 и t_3, м;

$И_е$ — испарение грунтовых вод за время Δt, определяемое лизиметрами первой группы, мм;

$И_л$ — испарение воды в лизиметре за время, Δt, мм;
w — площадь 1 га, или 10 000 м²;
w_1 — площадь лизиметра, м²;
μ — водоотдача грунтов.

Лизиметрическими исследованиями установлено, что при откачке инфильтрационных поливных вод из лизиметра хлопчатник развивается слабо. Влажность почвогрунтов зоны аэрации через 4—5 сут. после полива достигает прежнего (дополивного) состояния.

Растение начинает получать дополнительное питание за счет грунтовых вод. Если минерализация их превышает критическую величину (2—3 г/л), хлопчатник угнетается интенсивнее. При изучении испарения и инфильтрационного питания в лизиметрах с постоянным уровнем без откачки инфильтрационных вод растения развиваются так же, как и в естественных условиях, отражается действительный режим испарения с орошаемых массивов.

Согласно условиям опыта, кромка лизиметра описываемого типа устанавливается выше поверхности, на отметке поверхности земли, под пахотным слоем.

Лизиметрами третьего типа элементы баланса изучаются по естественному колебанию уровня грунтовых вод исследуемого участка (метод А. Ф. Сляднева). Для этого необходимо доливать в питательную трубку и отливать из нее воду в течение опыта.

В группу «емкостные» входят лизиметры М. М. Крылова, А. В. Лебедева, А. А. Роде, В. С. Конькова, В. М. Легостаева, А. Ф. Сляднева, М. С. Алимова, Сандерсона, Рамдас, Г. Ренковиста, Миллера и А. Тюрка. Ко второй группе мы относим лизиметры, работающие по принципу взвешивания, а также гидравлические испарители (почвенный испаритель ГГИ—51, ГГИ—500, ВНИГИЛ площадью 0,3 м², лизиметры Попова, Нифонтова, Ф. Доранто, М. А. Рыкачева, компенсационный испаритель В. А. Урываева и П. Н. Бурцева, Остромеки).

Величину испарения влаги в лизиметрах, работающих по принципу взвешивания (ГГИ—500), определяют по формуле (Лебедев, 1961)

$$V_n = N - У + \frac{10}{F}(a_1 - a_2),$$

где V_n — испарение, мм;
N — атмосферные осадки, выпавшие за время наблюдения, мм;
$У$ — просочившаяся часть атмосферных осадков, собранная в воронкообразном сосуде, мм;
F — площадь испарителя, м²;
a_1 — вес испарителя с почвой в начале опыта, г;
a_2 — то же, в конце опыта, г.

Через определенный период монолит внутреннего цилиндра перезаряживается.

Оптимальная конструкция лизиметров

В настоящее время в Советском Союзе функционирует свыше 450 лизиметров, испаряющая площадь которых изменяется от 0,1 до 5,2 м². В лизиметрах с малой площадью испарение интенсивнее, чем с большой, в связи с нарушением термического режима почв. В таких лизиметрах растительность, особенно хлопчатник, при развитии угнетается. А лизиметры с бóльшей приемной площадью требуют трудоемкой работы для установки и больших капиталовложений. Поэтому определение оптимальной площади лизиметров представляет большой научный и практический интерес.

При оптимальной площади лизиметра расход грунтовых вод на испарение и инфильтрация атмосферных осадков, поливных и промывных вод происходит так же, как в естественных условиях. Оптимальная площадь выбирается в зависимости от поставленных задач, природных условий района (литологическое строение пород, засоленность почвогрунтов зоны аэрации, климатические и гидрогеологические условия, микро- и мезорельеф местности, характер растительного покрова) и условий посева сельскохозяйственных культур. Испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод определяется главным образом степенью покрытости поверхности почвы растениями и их разновидностью. Чем больше заселен растениями участок, тем больше расход влаги на транспирацию. На величину транспирации существенно влияет интенсивность физиологического развития, глубина и ширина корневой системы растений.

Лизиметрические исследования, согласно целевому назначению, можно разделить на две категории: 1) для более углубленных научно-методических исследований формирования подземных вод, часто имеющих зональный характер; 2) для массовых экспериментальных и региональных наблюдений за испарением и инфильтрационным пополнением грунтовых вод при изучении их баланса (Лебедев, 1963).

Первая категория охватывает комплекс работ по выявлению факторов формирования испарения или инфильтрации. Для этого необходимо применять лизиметры с большой площадью и проводить дополнительные исследования по специальной программе. В программу работ включается изучение режима грунтовых вод, температурного режима воздуха и приземного слоя атмосферы, почвогрунтов зоны аэрации и грунтовых вод, направления и скорости ветра, барометрического давления, атмосферных осадков, миграции солей и влаги в почвогрунтах зоны аэрации и в грунтовых водах, физиологического развития стеблевой и корневой системы растений, режима водопользования и влияния его на величину испарения.

Исследования необходимо проводить в лизиметре и на окружающем поле. Результаты работ должны быть уточнены водобалансовыми расчетами. Программные исследования дают хорошие результаты при определении корреляционных зависимостей испарения от различных факторов. Эти виды работ обычно выполняются научно-исследовательскими организациями, освещающими круг вопросов методического характера.

Для второй категории исследований, проводимых с целью составления водного баланса, нет необходимости детально изучать факторы, определяющие испарение. Достаточно исследовать те, которые участвуют в подъеме или спаде уровня грунтовых вод (атмосферные осадки, поливные и промывные воды, температура воздуха, режим влажности и засоленности, а также термический режим почвогрунтов зоны аэрации) и физиологическое развитие растений.

С помощью применяемых лизиметров количественные показатели испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод должны определяться с достаточной точностью. Растения в лизиметрах должны развиваться так же, как в естественно-полевых условиях, не подвергаясь угнетению. На принятой площади лизиметра можно было бы проводить необходимые агротехнические мероприятия (промывки, поливы) для получения нормального развития растений и стабильной урожайности.

На величину испарения существенно влияет защищенность стенок лизиметра от прямых лучей солнца, поэтому устанавливаемые лизиметры желательно изготавливать из материалов, позволяющих поддерживать температурный режим монолита лизиметра, аналогичный почвогрунтам окружающего поля. Металлические лизиметры (изготавляемые из труб, листового железа) обладают большой теплоемкостью, в связи с чем при малой их площади нарушается термический режим монолита лизиметра. Монолит нагревается интенсивнее, поэтому увеличивается испарение. Уменьшения нагрева монолита можно достичь увеличением площади лизиметра или применением материалов с меньшей теплоемкостью (полиэтиленовые пленки, асбоцемент, дерево и др.).

Лизиметры Малекского опытного участка изготовлены из металла: малые площади 0,1 м^2 (конструкции М. М. Крылова) — из обсадных труб диаметром 14 дюймов, питающее дно — из листового железа толщиной 1,5 мм; большие лизиметры площадью 0,36; 1,0; 1,44; 2,0; 3,24 и 5,2 м^2 (конструкции М. С. Алимова) изготовлены из листового железа толщиной 4 мм. Рекомендуемые площади лизиметров для изучения испарения грунтовых вод, инфильтрации атмосферных осадков, поливных и промывных вод в орошаемых районах основываются на опыте применения металлических лизиметров.

Прежде чем определить оптимальную площадь лизиметров для различных сельскохозяйственных культур, следует рассмотреть результаты исследований ученых по данному вопросу.

А. В. Лебедев, изучая испарение грунтовых вод разными лизиметрами на Подмосковном гидрогеологическом стационаре института ВСЕГИНГЕО, пришел к выводу, что по размерам лизиметр должен быть таким, чтобы в нем можно было вырастить несколько кустов сельскохозяйственных культур; наиболее желательный размер поперечного сечения лизиметра — примерно 4 м² (Лебедев, 1963).

Площадь лизиметра 4,0 м², по нашему мнению, несколько преувеличена. Размеры лизиметров необходимо выбирать согласно условиям посева сельскохозяйственных культур. К правильному выводу пришел Д. М. Кац (1961), по его мнению, приемная площадь лизиметров — испарителей (сечение) должна быть такой, чтобы корневая система выращиваемой культуры развивалась нормально. Фазы вегетации, рост и состояние посевов, густота растений, их урожайность в лизиметрах должны быть такими же, как и на окружающем поле. Поэтому для каждой сельскохозяйственной культуры должна быть определенная площадь лизиметра. Сечение лизиметров при изучении испарения хлопчатником Д. М. Кац рекомендует брать 1,0 м², при изучении испарения грунтовых вод почвой без растительности — 0,1 м².

Как мы видим, вопрос об оптимальной площади лизиметров для исследования испарения с деятельной поверхности до настоящего времени является спорным. Для решения его на Малекском опытном участке в течение 1961—1965 гг. по нашему проекту установлены 98 лизиметров площадью 0,1, 0,36, 1,0, 1,44, 2,0, 2,25, 3,24, 5,2 м². Глубина воды в лизиметрах 1,0, 1,5, 2,0 и 3,0 м от поверхности земли. Лизиметры сконцентрированы на участках с хлопчатником, люцерной и почвой без растительности.

Оптимальная площадь лизиметров для районов с хлопчатником

В испарительном павильоне 3 под хлопчатник установлено 10 лизиметров площадью 0,1 м², в павильоне 4—36 площадью 0,36, 1,0, 1,44, 3,24 и 5,2 м² (рис. 16, табл. 25), из них 26 заряжены грунтами непарушенной и 20 нарушенной структуры. Хлопчатник в лизиметрах и на площадке сеяли квадратно-гнездовым способом с расстоянием между кустами 60×60 см, а в испарительном павильоне — трехгрядковым с расстоянием между кустами 30 см. Количество гнезд в лизиметре устанавливалось с учетом площади поперечного сечения лизиметра. В лизиметрах площадью 0,1 м² выращивали по одному стеблю хлопчатника из расчета 100 тыс. кустов хлопчатника (Крылов, 1960) на один гектар.

В лизиметрах квадратной формы выращивалось по три куста в одном гнезде. Количество гнезд хлопчатника зависело от размера сторон лизиметра. В лизиметре площадью 0,36 м² (0,6××0,6 м) засевалось одно гнездо, 1,0 м² (1,0×1,0 м) — четыре, с

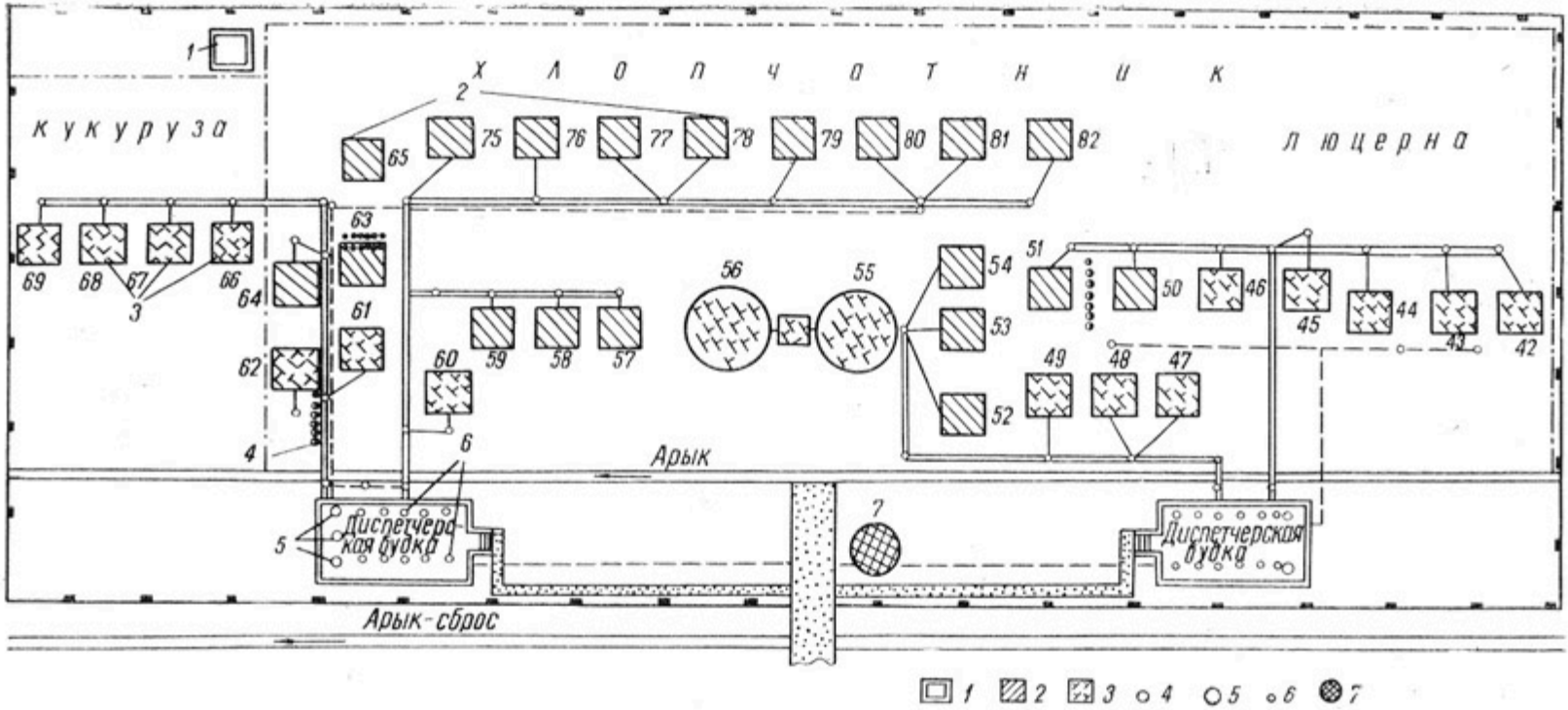

Рис. 16. План размещения лизиметров в испарительном павильоне 4.

1—испаритель с водной поверхности, *2*—лизиметры с ненарушенной структурой, *3*—лизиметры с нарушенной структурой, *4*—почвенные вытяжные термометры, *5*—бак оцинкованный емкостью 120 *л*, *6*—питательные баллоны емкостью 20 *л*, *7*—водонапорная башня.

расстоянием между гнездами 50×50 см, 1,44 м² (1,2×1,2 м) — четыре с расстоянием 60×60 см, 3,24 м² (1,8×1,8 м) — девять с расстоянием 60×60 см. Агротехнические мероприятия в лизиметрах и на площадке проводились согласно графику, установленному по совхозу «Малек». Для поливов хлопчатника использовали воду из канала «Малек», норма 800—1200 м³/га в зависимости от фазы физиологического развития растения. Испарение хлопчатником по месяцам и суммарное за год в лизиметрах площадью

Таблица 25

Размещение лизиметров в испарительном павильоне 4

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Глубина до воды, м	Структура грунта лизиметра
Хлопчатник			
46	1,0	2,0	Нарушенная
47	1,0	2,0	
48	1,0	1,5	
49	1,0	1,0	
50	1,0	1,5	Ненарушенная
51	1,0	1,0	
52	0,36	1,0	
53	0,36	1,5	
54	0,36	2,0	
55	5,20	1,5	Нарушенная
56	5,20	1,5	
57	0,36	1,0	Ненарушенная
58	0,36	1,5	
59	0,36	2,0	
60	1,0	2,0	Нарушенная
61	1,0	1,5	
62	1,0	1,0	
63	1,44	1,5	Ненарушенная
64	1,44	1,0	
65	1,44	2,0	Ненарушенная
75	1,44	1,0	
76	1,44	1,5	
77	1,44	2,0	
78	1,44	2,0	
79	0,36	1,0	
80	0,36	1,0	
81	0,36	2,0	
82	1,0	2,0	
Люцерна			
42	2,0	3,0	Нарушенная
43	2,0	2,0	
44	2,0	1,5	
45	2,0	1,0	
Кукуруза			
66	3,24	3,0	Нарушенная
67	3,24	2,0	
68	3,24	1,5	
69	3,34	1,0	

1,44 м² больше, чем в таковых площадью 0,36 м². Это отмечено для всех исследованных глубин уровня воды в лизиметрах (1,0, 1,5, и 2,0 м, табл. 26).

При изучении сезонного хода расхода грунтовых вод на испарение установлено, что в лизиметре площадью 0,36 м² при глубине уровня воды 1,0 м в первой декаде июня и во второй декаде июля испарение увеличилось, до конца вегетации наоборот. Физиологическое развитие хлопчатника в лизиметре площадью 1,44 м² в 1963 г. было почти таким же, как в естественных условиях.

Таблица 26

Сравнительная таблица испарения грунтовых вод хлопчатником по лизиметрам с различной испаряющей поверхностью и ненарушенной структурой грунта по опытному участку „Малек“ (за 1963 г.), м³/га

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Глубина до уровня грунтовых вод, м	Месяц									Сумма
			IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
36	0,1	1,0	—	—	272	142	214	200	131,6	46,5	—	1006,0
35	0,1	1,5	—	20	83,2	141,6	159,6	191,2	170,4	35,2	—	801,2
32	0,1	2,0	—	16,8	74,4	128,0	390,0	244,0	131,2	27,2	—	1016,6
57	0,36	1,0	110,73	123,78	350,44	1240,7	671,37	1136,14	232,3	25,52	10,2	4151,18
58	0,36	1,5	178,3	87,43	68,21	304,63	—	297,26	169,21	277,0	—	1596,82
59	0,36	2,0	89,2	87,76	35,3	63,37	464,08					
							295,6	318,97	198 8	23,33	—	1112,33
64	1,44	1,0	167,7	210,31	317,2	954,54	1972,07	1087,2	287,9	45,3	—	5294,98
63	1,44	1,5	42,24	120,99	99,96	429,86	1761,63	1048,61	119,1	21,9	—	3724,29
65	1,44	2,0	21,84	17,01	2,43	633,4	1745,8	781,6	221,0	126,33	15,8	3565,3

Таблица 27

Сводная таблица испарения грунтовых вод в лизиметрах без растительности с различной испаряющей площадью и ненарушенной структурой грунта по опытному участку „Малек“ за 1933 г., м³/га

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Глубина до уровня грунтовых вод, м.	Месяц												Сумма
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
16	0,1	1,0	—	90,0	100,0	48,0	290,0	499,5	443,1	377,7	352,5	205,0	108,5	52,41	2547,81
19	0,1	1,5	—	78,3	72,0	35,0	186,0	393,0	402,0	310,0	346,5	353,1	85,8	79,2	2343,2
20	0,1	2,0	—	120,0	—	10,0	100,0	70,7	140,0	150,0	150,0	325,0	100,0	52,0	1219,1
15	0,36	1,0	3,33	—	—	22,2	106,1	178,0	169,6	197,7	260,0	294,8	83,6	29,2	1346,39
6	0,36	1,5	13,86	25,0	54,0	67,5	144,4	84,7	138,2	143,05	190,27	202,08	71,5	31,9	1169,2
10	1,44	1,5	3,75	6,25	—	23,05	79,1	170,4	152,9	136,8	194,16	212,04	27,29	11,88	1020,56

Редукционный коэффициент по урожайности[1] в лизиметрах 62, 63 и 64 составлял соответственно 0,88, 0,95 и 0,66 по сухому весу стеблей[2] —0,74, 1,33 и 1,07 (Алимов, 1965). В лизиметрах 57, 58 и 59 площадью 0,36 м² редукционный коэффициент по урожайности значительно больше, чем в лизиметрах площадью 1,44 м²—1,21, 2,47, 3,54, а по сухому весу почти вдвое меньше — 0,40, 0,66 и 0,66.

В лизиметрах площадью 0,36 м² хлопчатник развивался угнетенно, размер зеленой массы и транспирационный коэффициент были меньше, поэтому величина испарения по сезонам года и за весь 1963 г. меньше. Угнетение растений произошло, видимо, в результате нарушения теплового режима и влажности почвогрунтов зоны аэрации. Значительно низкое испарение и угнетенное развитие хлопчатника отмечается в лизиметре площадью 0,1 м², годовое испарение при глубине уровня 1,0 м составляет 1006,6; 1,5 м—801,2 и 2,0 м —1016,6 м³/га, что в 2—3 раза меньше, чем в лизиметре площадью 1,44 м². Поэтому лизиметры площадью 0,1 м² для изучения испарения грунтовых вод с хлопкового поля неприемлемы. Сказанное подтверждается еще тем, что ширина корневой системы хлопчатника достигает 0,6—0,7 м, длина — 1,2—1,4 м. Диаметр лизиметра площадью 0,1 м² составляет 0,36 м, т. е. почти вдвое меньше диаметра горизонтальной проекции корневой массы хлопчатника. Меньший диаметр лизиметра способствует развитию корневой системы в глубину или скучиванию ее в зоне аэрации. В связи с этим растение развивается неравномерно. При интенсивном развитии растений поглощение влаги корневой системой с единицы площади существенно увеличивается.

Более приемлемой площадью лизиметров для получения достоверных величин суммарного испарения с хлопковых полей, по нашему мнению, является лизиметр площадью 1,0—1,5 м² в зависимости от способа посева хлопчатника. Рекомендуемая площадь лизиметра для изучения элементов питания и расходования грунтовых вод на испарение следующая:

Квадратно-гнездовой способ посева, см	*Размер сторон лизиметра, см*	*Кол-во гнезд хлопчатника*
60×60	120×120	4
50×50	110×100	4
45×45	90×90	4

[1] Отношение урожайности хлопчатника, полученное в естественных условиях к урожайности в лизиметре.

[2] Отношение сухого веса хлопчатника, сформированного в естественных условиях, к сухому весу растения в лизиметре.

Рядковый, см		
60×15 60×30	120×60 120×90	10 6

Примечание. Количество кустов хлопчатника в каждом гнезде выбирается на месте с учетом условий посева. Минерализация воды в лизиметре должна составлять не более 3—5 г/л, т. е. аналогична содержанию воднорастворимых солей в грунтовых водах орошаемых районов.

Во всех лизиметрах засеивается по четыре гнезда хлопчатника. Количество выращиваемых кустов в гнезде выбирается в зависимости от условий посева. При посеве квадратно-гнездовым способом с размером сторон 60×60; 50×50 и 60×45 см в гнезде должно быть не менее трех растений хлопчатника. При этом на 1 га площади приходится 75—85 тыс. растений. При посеве грядковым способом в гнезде хлопчатника должно быть по два растения. Приведенная густота и схема размещения растений рассчитана для сортов хлопчатника 108-ф, 149-ф, С-4727 и др., у которых растения имеют второй тип вегетации (Кондратюк, 1963).

Высота монолита в лизиметре должна быть не менее 1,5 м, что на 20—30 см превышает глубину проникновения корневой системы хлопчатника.

Применение лизиметров больших сечений необходимо для детального изучения факторов, формирующих испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод. Лизиметры необходимо оборудовать температурными кустами или электротермометрами, влагомерами, приборами, определяющими содержание солей в почвогрунтах зоны аэрации и в грунтовых водах и др. Данные наблюдений входят в первую категорию исследований и проводятся по специальной программе. Для массовых экспериментальных и региональных наблюдений за испарением грунтовых вод при изучении их баланса нет необходимости в увеличении приемной площади лизиметров, достаточно устанавливать лизиметры площадью, приведенной выше.

Оптимальная площадь лизиметра для почв без растительности

Экспериментальные исследования для решения рассматриваемого вопроса проводились в испарительном павильоне 1 по 26 лизиметрам. Площадь лизиметров составляла 0,1, 0,36, 1,0, 1,44 м². Горизонт воды устанавливался на глубинах 1,0, 1,5, 2,0 и 3,0 м от поверхности земли. Из 26 лизиметров 15 установлено с ненарушенной структурой грунта и 11 — с нарушенной.

Ростки растений в лизиметрах и на площади уничтожались. Участок преднамеренно не орошался. Замеры испарения и ин-

фильтрационного питания грунтовых вод производились непрерывно прибором.

Испарение грунтовых вод почвой без растительности варьирует по сезонам года. При глубине 1,0 и 1,5 м от поверхности земли бо́льшей величиной испарения характеризуется лизиметр площадью 0,1 м².

В лизиметрах площадью 0,36 и 1,0 м испарение по месяцам и сезонам года значительно меньше. Следует подчеркнуть, что величина испарения в лизиметрах площадью 1,00 м² несколько больше, чем в лизиметрах 0,36 м², но меньше, чем в лизиметрах 0,1 м². Так, испарение за июнь 1963 г. при глубине залегания уровня воды 1,0 м в лизиметре площадью 0,1 м² составило 499,5 м³/га; 0,36 м²—178,5; 1,0 м²—310,2. При глубине залегания уровня воды 1,5 м испарение с площади 0,36 м² почти аналогично испарению с площади 1,44 м². Завышенное испарение при указанной глубине наблюдается в лизиметре площадью 0,1 м². За 1963 г. при глубине уровня воды 1,0 м с площади 0,1 м² испарение составляет 2636,7 м³/га; 0,36—1345,03, при глубине уровня воды 1,5 м соответственно —0,1 м² — 2343,2, 0,36—1177,7, 1,44—1017,62 м³/га (табл. 27).

Таким образом, с уменьшением приемной площади лизиметров расход грунтовых вод на испарение увеличивается. Это объясняется, по-видимому, нарушением термического режима почвогрунтов зоны аэрации и грунтовых вод в лизиметрах площадью 0,1 м 1,0 м², что обусловлено нагреванием их стенок (Алимов, 1962).

Парадоксальные зависимости получаются в осенне-зимние периоды. Инфильтрационное питание грунтовых вод за счет атмосферных осадков в лизиметрах площадью 0,1 м² в 2—3 раза меньше, чем в лизиметрах 0,36, 1,0 и 1,44 м². Так, с октября по декабрь выпало 123,2 мм атмосферных осадков. Из них на подъем уровня воды в лизиметрах при залегании последнего на глубине 1,0 м в лизиметре площадью 0,1 м² израсходовано 32,0 мм осадков, 0,36—67,58 и 1,44—100,93 мм; при глубине залегания уровня 1,5 в лизиметре площадью 0,1 м² соответственно 17,5 мм; 0,36—56,14 и 1,44—54,98 мм; при глубине 2,0 в лизиметрах площадью 0,1 м²—12,0 мм; 0,36—27,78 и 1,44—29,29 мм.

На основании этих данных можно сделать вывод о том, что абсолютное содержание влаги в зоне аэрации в лизиметрах площадью 0,1 м² в течение года ниже, чем в лизиметрах площадью 0,36 и 1,00 м² (за счет завышенного испарения). Выпавшие атмосферные осадки расходуются на пополнение запасов влаги почвогрунтов зоны аэрации монолита, в связи с чем подъем уровня воды в лизиметре площадью 0,1 м² (в результате инфильтрации осадков) сравнительно невелик.

Таким образом, при использовании металлических лизиметров приемную площадь их следует несколько увеличить для уменьшения иссушения монолита под влиянием нагрева стенок лизимет-

ра. Для удобства (подъема и спуска монолита, надевания его на основной бак лизиметра и др.) нужно применять лизиметры квадратной формы. Действительные результаты испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод можно получить, применяя лизиметры площадью 1,0 м², размером 1,0×1,0 м. При этом высота основного бака лизиметра для глубин горизонта воды 1,0, 2,0, 1,5 и 3,0 м должна быть соответственно 1,2, 2,2, 1,7 и 3,2 м.

Оптимальная площадь лизиметров для люцерны

Испарение люцерны (многолетние травы) изучалось в испарительном павильоне 3 в 10 лизиметрах и 4 в 14 (в южной половине павильона). Лизиметры испарительного павильона 3 имеют цилиндрическую форму, а павильона 4 — квадратную с приемной площадью 0,36, 1,0, 1,44 и 2,0 м². Абсолютные величины расхода грунтовых вод на испарение с единицы площади люцерной первого года посева в 1963 г. в лизиметре площадью 0,36 и 1,0 м² почти одинаковы с незначительным отклонением.

Суммарное испарение в лизиметрах площадью 1,0 м² больше, чем 0,36 м². Так, при глубине залегания уровня 1,0 м испарение в лизиметре площадью 1,0 м² на 2387,77 м³/га больше, чем в лизиметре площадью 0,36 м²; при глубине уровня 1,5 м разница в испарении составляет значительно большую величину (4622,59 м³/га). Такое различие в испарении объясняется тем, что в лизиметрах площадью 1,0 м² растения за отчетный период развивались относительно равномерно, без угнетения.

При глубине залегания уровня воды в лизиметре 2,0 м наблюдалась обратная картина. Испарение в лизиметре площадью 0,36 м² на 3616 м³/га больше, чем в лизиметре площадью 1,44 м². В этом лизиметре в связи с высоким содержанием солей в верхней части монолита (промывка проведена неудачно) растения развивались неравномерно. Количество ростков люцерны значительно меньше, чем в лизиметрах площадью 0,36 и 1,0 м², в связи с чем годовая величина испарения меньше (табл. 28).

Лизиметры приемной площадью 0,1 м² не пригодны для изучения испарения с люцерновых полей. В них, как и в хлопковых лизиметрах, корневая система растений развивается неравномерно, наблюдается их скучивание, благодаря чему полученные результаты по испарению грунтовых вод являются завышенными. Кроме того, в связи с нагреванием стенок лизиметра нарушается термический режим монолита. Наиболее приемлемая площадь лизиметра для изучения испарения грунтовых вод многолетними травами, естественной растительностью — 1,0 м² (1,0×1,0 м).

При этом обеспечивается определение с достаточной точностью инфильтрационного питания грунтовых вод. Термический режим почв близок к естественным условиям. Высоту лизиметра следует выбрать с учетом глубины проникновения корневой си-

Таблица 28

Сводная таблица испарения грунтовых вод люцерной первого года посева по лизиметрам с различной испаряемой поверхностью и ненарушенной структурой грунта по опытному участку „Малек" за 1963 г., м³/га

Номер лизиметра	Площадь лизиметра, м²	Глубина до уровня грунтовых вод, м.	Месяц									Сумма
			IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
26	0,1	1,0	—	160,0	844,4	1433,6	1100,7	672,2	748,8	204,8	—	5164,9
25	0,1	1,5	—	98,0	180,0	750,0	648,0	636,0	321,3	172,0	—	2805,1
22	0,1	2,0	—	36,6	164,7	331,6	256,2	555,1	551,5	173,0	—	2072,3
52	0,36	1,0	808,8	472,22	183,33	577,61	188,0	1433,21	2043,6	102,8	4,16	5813,0
53	0,36	1,5	136,25	105,0	110,0	115,27	133,75	221,88	895,0	127,52	12,50	1851,1
54	0,36	2,0	577,6	245,76	72,23	272,21	1074,9	949,89	1962,5	233,3	63,5	5452,2
51	1,0	1,0	119,5	687,5	327,5	850,0	2969,0	1713,0	2360,0	165,0	10,0	9201,5
50	1,0	1,5	145,66	364,78	131,35	376,2	1789,47	1386	2106,3	171,0	9,0	6479,7
46	1,44	2,0	23,21	112,85	21,12	51,76	422,39	273,78	578,88	287,11	165,2	1936,3

Примечание. В лизиметрах 22, 25 и 26 люцерна первого года посева (1961 г.).

стемы растений. Для изучения испарения с глубины 1,0 и 1,5 м целесообразно установить лизиметры высотой монолита 2,3 м.

Надо отметить, что площадь лизиметра для люцерны следует выбирать с учетом севооборота. Если в районе исследования на четвертый год после посева люцерны намечается выращивать хлопчатник, целесообразно установить лизиметры, соответствующие условиям посева хлопчатника.

Лизиметрическая установка для изучения элементов баланса грунтовых вод

Наиболее точные результаты по испарению и инфильтрационному питанию грунтовых вод можно получить при такой конструкции лизиметра, когда подача воды или откачка инфильтрационных вод производится автоматически, уровень воды в лизиметре поддерживается постоянно на нужной отметке в течение всего опыта. Растения в лизиметре развиваются свободно, без угнетения. Поливные воды окружающей площади не просачиваются в лизиметры или из них. Сам лизиметр не имел течи и был надежным для многолетних наблюдений.

Выше мы рассмотрели лизиметры, отличающиеся по конструктивным особенностям и принципу работы. Мы предлагаем новую лизиметрическую установку для изучения испарения и ин-

фильтрационного питания грунтовых вод, наиболее надежную и приемлемую для районов орошаемого земледелия (рис. 17). Испарение грунтовых вод определяется по величине воды, долитой в питательную трубу; инфильтрационное питание грунтовых вод — по воде, слитой через инфильтрационную. Данный лизиметр предложен нами в 1961 г. и испытан на опытном участке «Малек» в Голодной степи. Основной бак лизиметра заряжается грунтом естественной структуры. Изготавливается он из полукотельного листового железа толщиной 4 мм. Края бака для жесткости обшиваются уголковым железом 50×50 мм или лучше 75×75 мм. Нижняя часть бака, входящая в питательное дно, обшивается при помощи сварки без уголкового железа. Высота этой части бака 30 мм. Высота описываемого бака выбирается в зависимости от глубины уровня воды в лизиметре. Для лизиметра с глубиной уровня воды 1,0 м высота бака должна быть 1,33; 1,5 м—1,83; 2,0—2,33 и 3,0—3,33 м. При этом 0,3 м составляют зону насыщения монолита, а 0,03—часть, входящую в питающее дно. При выборе размера бака необходимо учитывать условия посева растений. Питающее дно лизиметра, как и основной бак, изготавливается из листового железа толщиной 4 мм. В него входит основной бак, поэтому размер его должен быть на 2 см больше, чем размер основного бака. Если ширина сторон бака составляет 1,2×1,2 м, то питающего дна —1,22×1,22 м, высота питающего дна 0,4 м. В нем создается обратный фильтр: снизу отсортированный гравий толщиной 25 см, затем среднезернистый песок 15 см. В питающее дно обратного фильтра устанавливаются дырчатые трубы, имеющие перфорацию для увлажнения монолита лизиметра. Трубы свариваются под углом таким образом, чтобы илистые частицы смывались в отстойник питательной трубы. Питательная труба время от времени желонируется для очистки отстойника от глинистых фракций. Для предотвращения поступления зерен песка и гравия сверху перфорированной части труб питающего дна укладывается сетка галунного плетения. Диаметр отверстия в трубках 6—8 мм. Дырчатые трубы соединяются с питательной трубой соединительной трубкой диаметром 89 мм.

Важный узел лизиметра — питательная и инфильтрационная трубы. Они соединяются на отметке уровня воды лизиметра. Соединение необходимо для стока инфильтрационных вод, накопившихся во время выпадения атмосферных осадков, проведения поливов и промывок. Инфильтрационные воды стекают через отверстия прохода инфильтрационных вод в инфильтрационную трубу. Диаметр отверстия трубы 15 мм, в средней части трубы устанавливается вентиль.

Инфильтрационная труба внутри имеет поплавок, тросик поплавка и камеру регулирования, при помощи которых осуществляется непрерывное пополнение той части влаги, которая расходуется на испарение.

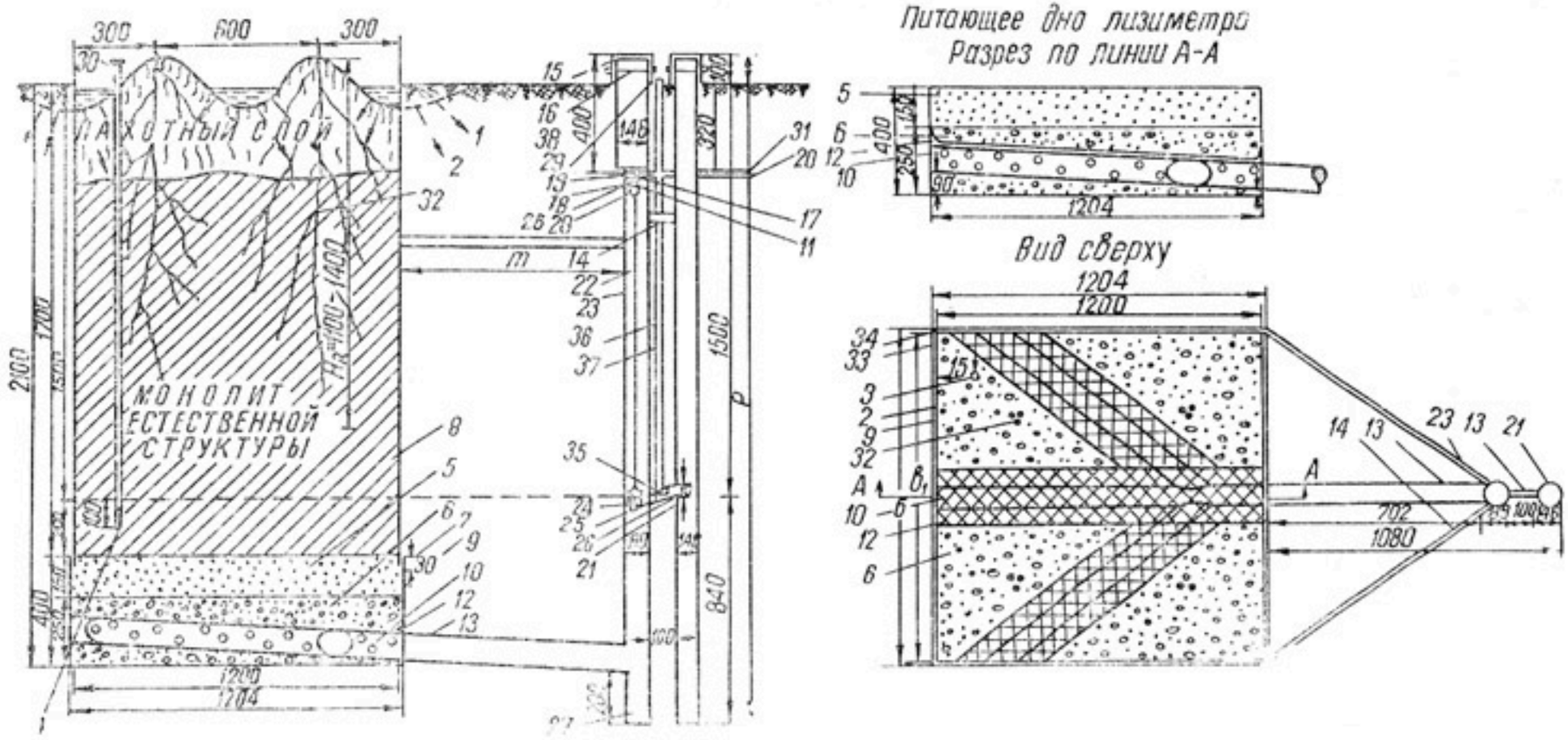

Рис. 17. Лизиметр для изучения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод . (по М. С. Алимову).

1—монолит, *2*—основной бак лизиметра, *3*—наблюдательная труба, *4*—фильтровая часть наблюдательной трубы, *5*—настил из песка, *6*—настил из гравия, *7*—шов сварки, 8—уровень воды лизиметра, *9*—питающее дно, *10*—дырчатая труба, *11*—стальная пластинка, *12*—сетка, *13*—соединительная труба, *14*—труба жесткости, *15*—крышка, *16*—болт крепления, *17*—патрубок для крепления стальной пластины, *18*—патрубок для прохода воды, *19*—камера регулирования прибора автоматического питания, *20*—полихлорвиниловая трубка, *21*—инфильтрационная труба, *22*—тросик поплавка, *23*—питательная труба, *24*—поплавок, *25*—отверстие для прохода инфильтрационных вод, *26*—ковш с резиновым манжетом внутри, *27*—отстойник, *28*—крючок тросика поплавка, *29*—рукоятка вентиля, *30*—деревянная пробка, *31*—предохранительная труба, *32*—хлопчатник, *33*—угольник основного бака, *34*—угольник питающего дна, *35*—вентиль, *36*—предохранительная трубка вентиля, *37*—стержень, *38*—предохранительная трубка.

По верху инфильтрационной трубы приваривается предохранительная труба диаметром 146 мм, высотой 0,4 м, служащая для предохранения стока поливной воды в питательную трубу. Инфильтрационная и предохранительная трубы соединяются сваркой или резьбой. При резьбовом соединении резьбу следует обмотать паклей для предотвращения доступа поливной воды площадки. Верх предохранительной трубы закрывается крышкой. На глубине 0,32 м питательная труба имеет отверстие диаметром 6 или 8 мм, куда вставляется патрубок регулирования прибора автоматического питания лизиметра.

Стержень вентиля выводится на поверхность для определения величины подъема грунтовых вод за счет инфильтрационных (при закрытом вентиле). Стержень вентиля необходимо уложить внутри предохранительной трубки. Диаметр трубки 10—15 мм, инфильтрационной трубы —146 мм. Инфильтрационная труба сверху закрывается крышкой. Величина инфильтрационных вод, накопленных в ней, определяется умножением площади свободной части трубы на высоту инфильтрационного слоя воды.

Для откачки воды удобно пользоваться вакуум-насосом Камовского. В тело монолита закладывается трубка для наблюдения за уровнем воды лизиметра. Фильтровая часть ее устанавливается в зоне насыщения ниже уровня. В нижнюю часть фильтра забивается деревянная пробка, заостренная книзу. Верх трубки закрывается пробкой, фильтровая часть наблюдательной трубки — кошмой. Трубка устанавливается забивным способом. Монолит лизиметра в верхней части имеет пахотный слой толщиной 35—40 см. По средине монолита проходит одна борозда; по краям —0,5 борозды. В среднюю борозду воды подается вдвое больше, чем в одну крайнюю. Предлагаемый лизиметр отличается от лизиметров А. В. Лебедева, А. А. Роде, А. Ф. Сляднева простотой конструкции, позволяет поддерживать уровень воды на постоянной отметке в течение всего опыта, с достаточной точностью определяется величина подъема уровня грунтовых вод в результате инфильтрации (атмосферных осадков, поливных и промывных вод). Открытием вентиля определяется количество инфильтрационных вод.

При постановке дополнительных работ, позволяющих изучить факторы, формирующие испарение, с помощью предлагаемого лизиметра можно решить еще ряд проблемных вопросов, представляющих большой интерес для воднобалансовых расчетов:

1) процесс испарения и закономерности передвижения влаги и солей в зоне аэрации;

2) связь зоны аэрации с режимом грунтовых вод;

3) количественное выражение испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод,

4) связь составляющих элементов баланса с режимом грунтовых вод, процессом передвижения влаги и солей в зоне аэрации;

5) параметры агротехнических мероприятий: начало и конец поливов, межполивной период, начало водопотребления растениями оросительных и грунтовых вод, начало очередного полива и подсоса соленых грунтовых вод в корнеобитаемый слой;

6) недостаток насыщения или водоотдачи грунтов и изменение их в зависимости от колебания уровня грунтовых вод и испарения;

7) критическую глубину испарения и засоления;

8) зависимость урожайности хлопчатника от глубины залегания уровня и минерализации грунтовых вод;

9) скорость подъема капиллярной влаги на поверхность и вынос солей из грунтовых вод.

Лизиметром предлагаемой конструкции, кроме того, можно определять фильтрационные свойства водоносных пород. Коэффициент фильтрации водоносных горизонтов — один из основных гидрогеологических параметров при подсчетах запасов подземных вод, расчетах вертикального дренажа и др. Этот параметр представляет интерес, когда производится расчет перетекания воды снизу вверх или обратно.

Принцип лизиметрического метода определения коэффициента фильтрации пород заключается в следующем.

Лизиметр с монолитом естественной структуры рассматривается как двухслойная среда — снизу песок или гравий, сверху менее проницаемая порода — суглинок или супесь. Коэффициент фильтрации покровного суглинка определяется в условиях напорной фильтрации при движении воды снизу вверх или обратно при отсутствии испарения или инфильтрации. Для опыта использовали лизиметрическую установку с глубиной уровня грунтовых вод 2 или 3 м от поверхности (рис. 18).

Поперечное сечение лизиметра 1×1 м, основной бак заряжается грунтом (на высоту 2,3 или 3,3 м) с ненарушенной структурой, при этом 30 см составляют зону насыщения грунтовых вод. Под монолит в поддонник помещается более проницаемая порода: песок или гравий. Поддонник снизу имеет фильтровые трубы, соединяющиеся с питательной трубой, выведенной на поверхность. Питательная труба, подающая воду, на глубине 2 или 3 м, соединена с инфильтрационной. Соединительная трубка имеет вентиль для слива воды.

В теле монолита через каждые 0,3 м установлены пьезометры диаметром 12 мм. Один из пьезометров помещается в подстилающий песчаный слой. После оборудования лизиметра соответствующими пьезометрами вентиль закрывается наглухо. Затем доливом воды (Q) через питательную трубу в песчано-гравелистой подушке монолита создается напор величиной H_2. Первоначальный уровень грунтовых вод в лизиметре (при $t=0$) с отметкой H_1 располагается ниже пьезометрического уровня с отметкой H_2 в песчано-гравелистой толще, т. е. $H_2-H_1=\Delta H$. Под влиянием

разности напоров ΔH уровень грунтовых вод с отметкой H_1 начинает приближаться к поверхности, т. е. воды песчаного горизонта путем вертикальной напорной фильтрации перетекают в покровные суглинки. Объем воды Q, доливаемой через питательную трубу, спустя некоторое время начинает уменьшаться. При отсут-

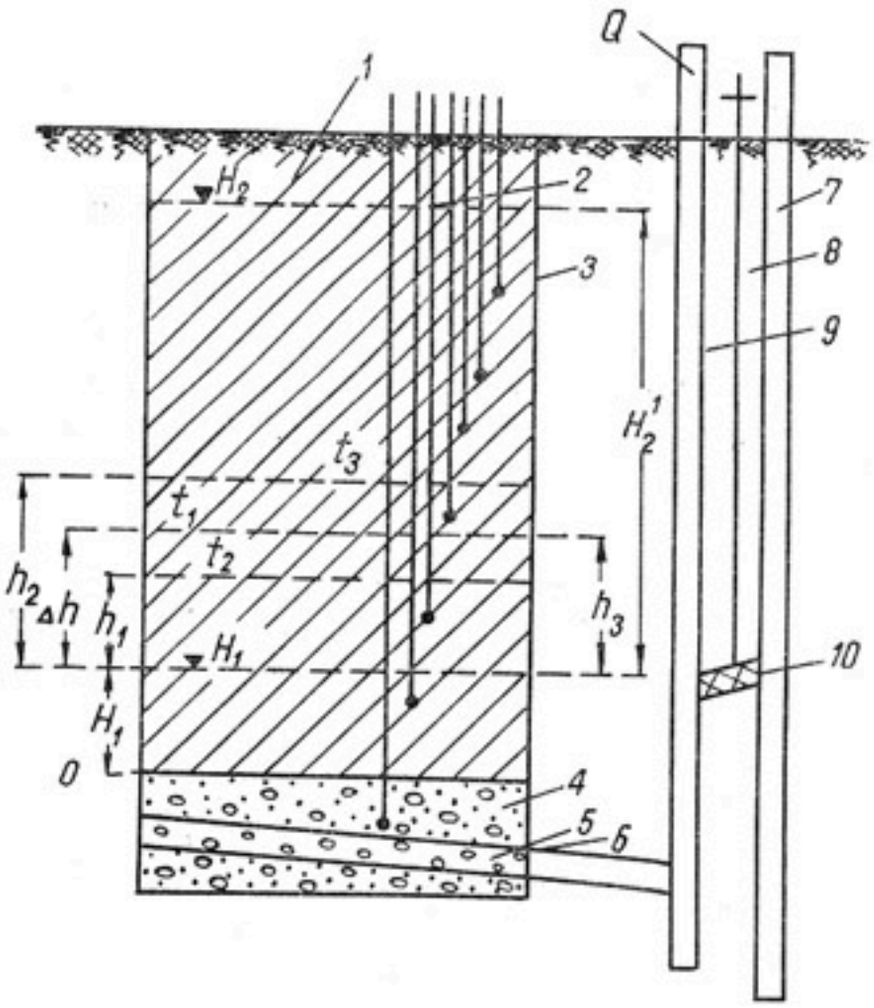

Рис. 18. Лизиметрическая установка для определения коэффициента фильтрации пород.

1—монолит из суглинка, *2*—забивные пьезометры, *3*—основной бак лизиметра, *4*—гравийная подстилка, *5*—фильтровая труба, *6*—питающее дно, *7*—инфильтрационная труба, *8*—стержень вентиля, *9*—питательная труба, *10*—вентиль.

ствии испарения грунтовых вод и инфильтрации сверху наблюдается следующее:

$$\pm W = 0,\ H_1 \longrightarrow H_2,\ Q \longrightarrow 0.$$

Одновременно уменьшается объем воды, перетекающий снизу вверх, т. е.

$$qb \longrightarrow 0.$$

Таким образом, когда пьезометрический уровень подстилающих песчаных горизонтов расположен выше уровня грунтовых вод в суглинках, условия опыта для определения K_Φ будут

$$Q \longrightarrow 0;\ qb \longrightarrow 0;\ \mu = \text{Const};\ F = \text{Const}.$$

Интенсивность изменения уровня грунтовых вод H_1 в лизиметре до пьезометрического уровня H_2 в начальный период имеет прямолинейный, а затем криволинейный характер. Для слоя В уравнение баланса грунтовых вод имеет вид

$$\mu \frac{h_2 - h_1}{\Delta t} = \frac{qb}{F} \pm W_{ср}, \qquad (1)$$

здесь h_2 — уровень грунтовых вод в лизиметре (в момент времени t_3), мм;

h_1 — те же (в момент времени t_2), мм;

μ — коэффициент недостатка насыщения или водоотдачи породы экспериментально определяемый путем доливов и отливов воды в лизиметре;

Δt — расчетный период, $t_3 - t_2 = \Delta t$, сутки;

qb — количество воды, перетекающей снизу вверх, м³/сутки;

$\pm W$ — испарение (+) или инфильтрационное питание (+) грунтовых вод в лизиметре, мм.

Перетекание воды снизу определяется из уравнения

$$qb = K_ф \cdot F \frac{H_2 - h_3}{h_3}, \qquad (2)$$

где H_2 — постоянная во времени отметка пьезометрического уровня или величина напора H_2 в подстилающей песчано-галечниковой породе, м;

h_3 — отметка уровня грунтовых вод лизиметра или путь фильтрации к моменту времени t, м;

$K_ф$ — коэффициент фильтрации покровных отложений, м/сутки.

Подставляя значения qb в уравнение (1) и считая $F = 1м^2$, получим

$$\mu \frac{\Delta h}{\Delta t} = K_ф \frac{H_2 - h_3}{h_3}; \qquad (3)$$

здесь $\lim \frac{\Delta h}{\Delta} = \frac{dh}{dt}$, $\Delta h = h_2 - h_1$

$$\Delta t = t_3 - t_2.$$

При однородных по вертикали водосодержащих покровных суглинках путь фильтрации или напор грунтовых вод h_3 в начальный период времени изменяется по закону прямолинейной зависимости, поэтому $h_3 = f(t) = Ct$ (C — постоянная скорость подъема уровня). Отклонение от этой зависимости отмечено в конечной стадии насыщения лизиметра в связи с изменением напорного горизонта. Скорость подъема уровня C=Const находится с помощью зависимости $h_3 = f(t)$.

Принимая, таким образом, напор или путь фильтрации в начальный период времени равным $h_3 = Ct$, имеем

$$\mu \frac{dh}{dt} = K_ф \left(\frac{H_2}{h_3} - 1 \right) \pm W_{ср} = K_ф \left(\frac{H_2}{C} - 1 \right) \pm W_{ср}. \qquad (3.1)$$

В нашем случае $H_2 = \text{Const}$; $\frac{H_2}{C} = C_0 = \text{Const}$, тогда

$$\mu \frac{dh}{dt} = K_\phi \left(\frac{C_0}{t} - 1 \right) \pm W_{ср} . \qquad (3.2.)$$

Разделяя переменные и интегрируя выражение (3.2), получим

$$\mu \int_{h_1}^{h_2} dh = K_\phi \int_{t_2}^{t_3} \left(\frac{C_0}{t} - 1 \right) dt \pm W_{ср} , \quad \int_{t_2}^{t_3} dt =$$

$$= K_\phi C_0 \int_{t_2}^{t_3} \frac{dt}{t} - K_\phi \int_{t_2}^{t_2} dt \pm W_{ср} \int_{t_2}^{t_3} dt \qquad (3.3)$$

или

$$\mu (h_2 - h_1) K_\phi C_0 \ln \frac{t_3}{t_2} - K_\phi (t_3 - t_2) \pm W_{ср} (t_3 - t_2) ,$$

откуда

$$\mu (h_2 - h_1) = K_\phi C_0 \ln \frac{t_3}{t_2} - K_\phi \Delta t \pm W_{ср} \Delta t. \qquad (3.4.)$$

При отсутствии в лизиметре испарения или инфильтрационного питания грунтовых вод $(\pm W_{ср} = 0)$

$$\mu \Delta h K_\phi C_0 \ln \frac{t_3}{t} - K_\phi \Delta t = K_\phi \left(2{,}3 C_0 \ln \frac{t_3}{t_2} - \Delta t \right) . \qquad (3.5)$$

Из уравнения (3.5.) коэффициент фильтрации покровных отложений при вертикальной напорной фильтрации снизу имеет вид

$$K_\phi = \frac{\mu \Delta h}{2{,}3 C_0 \lg \frac{t_3}{t_2} - \Delta t} . \qquad (4)$$

Если пьезометрический уровень песчано-галечниковых отложений расположен ниже уровня грунтовых вод лизиметра, то величина K_ϕ определяется дренированием монолита лизиметра. Для этой цели открывают вентиль соединительной трубки и сливают воду из питательной трубы. При этом из инфильтрационной трубы непрерывно сливается вода, расход которой численно равен количеству воды, перетекающей сверху вниз в подстилающие песчано-гравийные отложения.

В результате наблюдений на опытном участке в совхозе «Малек» в Голодной степи определены величины насыщения монолита лизиметра снизу. При этом получены параметры

$$h_1 = 1\text{м}, \quad H_2 = 2\text{м}, \quad t_3 = 10 \text{ сут}, \quad t = 0$$

$$h_2 = 1{,}8 \text{ м}, \quad H_1 = 0, \quad \mu = 0{,}08, \quad t_2 = 5{,}5 \text{ сут}.$$

$$C = \frac{h_3}{t_3} = \frac{1,8}{10} = 0,18 \text{ м/сут},$$

$$C_0 = \frac{H_2}{C} = \frac{2}{0,18} = 11,1 \text{ сут.},$$

$$\Delta t = t_3 - t_2 = 10 - 5,5 = 4,5 \text{ сут.},$$

$$\Delta t = 1,8 - 1,0 = 0,8 \text{ м},$$

$$\frac{t_3}{t_2} = \frac{10}{5,5} = 1,82.$$

Подставив эти параметры в уравнение (4), получим

$$K_ф = \frac{0,08 \cdot 0,8}{11,1 \cdot \ln 1,82 - 4,5} = \frac{0,064}{11,1 \cdot 2,3 \cdot 0,26 - 4,5} = \frac{0,064}{2,2} = 0,029 \text{ м/сут}.$$

Таким образом, при помощи лизиметров можно определить коэффициент фильтрации покровных суглинков в условиях напорной фильтрации снизу вверх или сверху вниз. При этом до начала опыта необходимо получить полное капиллярное увлажнение зоны аэрации над уровнем грунтовых вод монолита лизиметра.

Установка лизиметра

Успех результатов лизиметрического исследования зависит прежде всего от правильного выбора экспериментальной площадки, которая по природным и водохозяйственным условиям не должна отличаться от района, где намечается распространить результаты лизиметрических наблюдений. При этом надо учитывать то обстоятельство, что для установки глубоких лизиметров, особенно с уровнем воды 3 м и более, на выбранной площадке уровни грунтовых вод в осенне-зимний период должны залегать на глубине более 3—4 м. В противном случае невозможно будет отбирать монолиты естественной структуры и устанавливать объем лизиметров и приборов, необходимый для решения поставленных задач.

Размеры экспериментальной площадки зависят от количества приборов и оборудования, необходимых для воднобалансовых расчетов, а также способа их размещения в плане. Количество приборов и лизиметрических установок выбирается в зависимости от поставленных задач. В случае, когда требуется более углубленное изучение испарения и инфильтрации, выявление закономерностей их формирования под влиянием естественных и искусственных факторов, на площадке устанавливается комплекс приборов и оборудования.

Исследование проводится несколькими методами, позволяющими вскрыть эти закономерности. Для составления водно-солевого баланса грунтовых вод определенных территорий достаточно

того минимума лизиметров и приборов, которые показаны на рис. 19. Размеры экспериментальной площадки 50×100 м. Лизиметрические исследования ведутся в трехкратной повторности. Для изучения испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод хлопковых полей необходимо установить 18 лизиметров с уровнем воды в них 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 и 3,5 м. На лизиметрической площадке устанавливаются дождемер, снегомер, термометры, анемометры, куст пьезометров и водосливы. Для оценки точности лизиметрических наблюдений следует установить еще 3 лизиметра, по которым необходимо вести изучение испарения и инфильтрационного питания по естественному колебанию уровня грунтовых вод.

Для оценки солевого баланса исследуемого района требуется экспериментальное изучение миграции солей в зоне аэрации и грунтовых водах под влиянием поливов и промывок. Для этого рекомендуется оборудование площадки лизиметрической установкой МС — 1 (рис. 19). Установка испытана на опытном участке «Камонгарон» Бухарской гидрогеологической и инженерно-геологической партии в 1972—1974 гг., при этом получены положительные результаты по оценке изменения содержания солей в поливных водах в процессе их миграции в зоне аэрации (Алимов, 1976).

В настоящее время в хлопкосеющих районах аридной зоны СССР применяется хлопково-люцерновый севооборот. Значительная часть земель засевается люцерной. В связи с этим требуется определение величины испарения и инфильтрации на площадях с посевом люцерны. Для решения этой задачи на экспериментальной площадке устанавливается еще серия лизиметров, аналогичная хлопковой.

Таким образом, на экспериментальной площадке для оценки элементов водно-солевого баланса грунтовых вод требуется установить 36 лизиметров с постоянным уровнем, 6 с переменным и 2 лизиметрические установки МС-1, приборы для учета климатических факторов, куст пьезометров. Размещение лизиметров в натуре осуществляется с учетом условий посева хлопчатника. Между лизиметрами должно проходить 6 грядок посева хлопчатника. Такое же количество грядок необходимо между крайним рядом лизиметров и ограждением. Все лизиметры соединяются при помощи трубопровода с диспетчерской будкой, откуда производится непрерывная подача воды. Они оборудуются приборами автоматического питания и инфильтрационными трубами для непрерывного слива инфильтрационных вод.

Прежде чем перейти к установке лизиметров следует произвести подготовительные работы: изготовить лизиметры нужных размеров, проверить основной бак и питающее дно лизиметра на течь, изготовить подъемные приспособления для подъема основного бака лизиметра с монолитом. Проверка на течь осуществляется протиркой тряпкой, смоченной керосином. При наличии отверстий

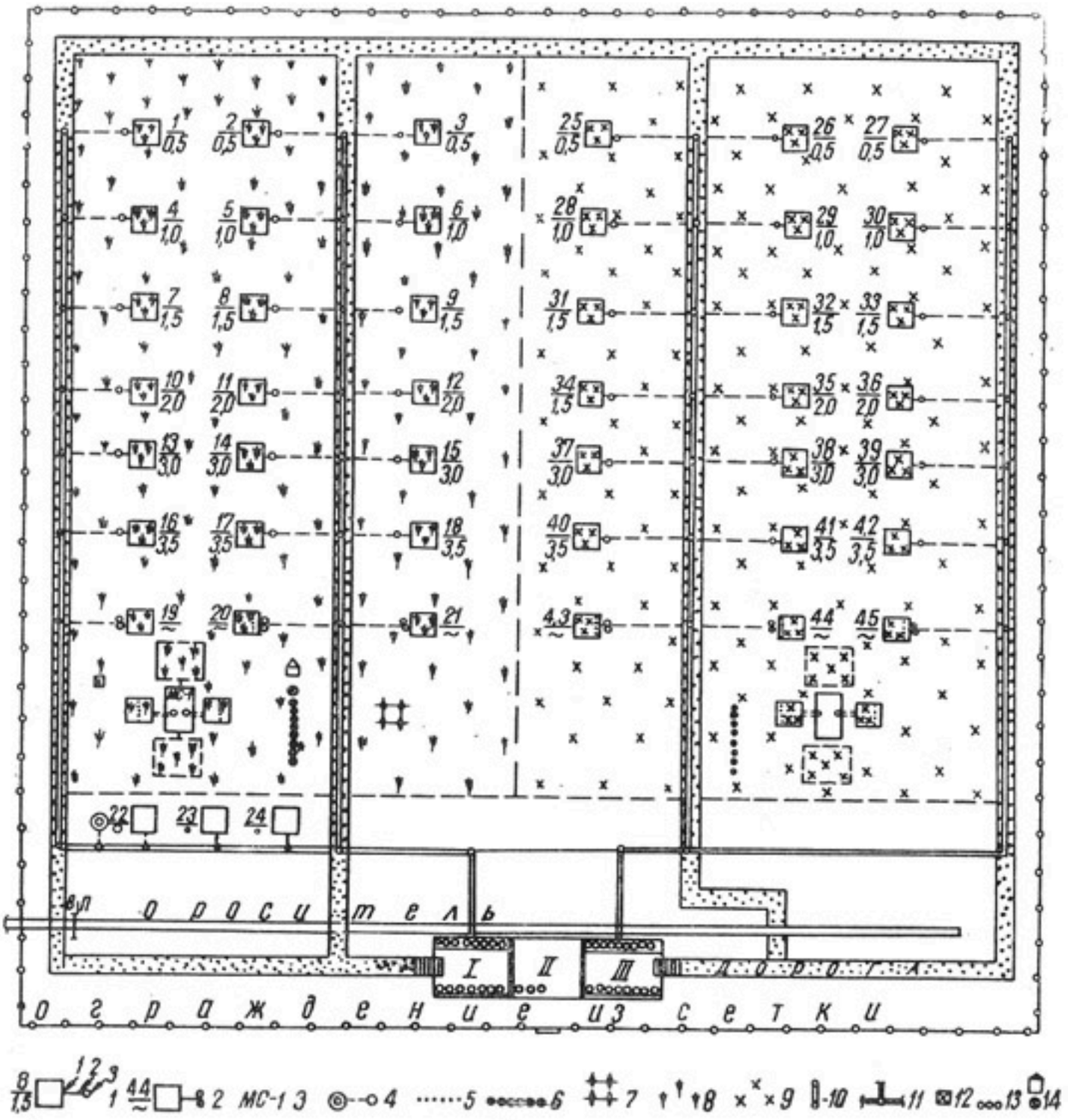

Рис. 19. Макет-схема размещения приборов и оборудования на опытно-экспериментальной площадке для изучения элементов баланса грунтовых вод орошаемых территорий Узбекистана.

1 – лизиметрическая установка, состоящая из основного корпуса (1), питательной системы (2) и системы сбора инфильтрационных вод (3). Слева в числителе номер, в знаменателе – глубина уровня грунтовых вод, м: *2* – лизиметрическая установка для изучения испарения и инфильтрации при переменном уровне грунтовых вод. Испарение и инфильтрация замеряются автоматическим прибором АРУ – I; *3* – лизиметрическая установка для изучения миграции солей в зоне аэрации при поливах и промывках, дренажного модуля орошаемых территорий; *4* – испаритель с водной поверхности; *5* – установка „гирлянда" для регистрации изменения влажности зоны аэрации; *6* – вытяжные термометры; *7* – пьезометрический куст; *8* – посевы хлопчатника; *9* – посевы люцерны. *10* – ограждения из сетки; *11* – трубопроводы соединительные; *12* – наблюдательный шурф; *13* – тарированные емкости; *14* – дождемер и будка для замера температуры воздуха: I, III – пункт автоматической подачи воды в лизиметры; II – пункт первичной обработки материалов и лизиметрических наблюдений.

в швах лизиметра на обратной стороне его появляются пятна различного размера. В этом случае требуется повторная сварка швов лизиметра и проверка их на течь.

Окончательная проверка лизиметров на течь осуществляется в шурфе, когда основной бак с монолитом и питающее дно с обратным фильтром соединены сваркой. Для этого производится долив воды через питательную трубу, и уровень воды в монолите лизиметра устанавливается на максимальной отметке грунтовых вод экспериментальной площадки. При отсутствии течи воды из лизиметра осуществляется засыпка шурфа породой, извлеченной при отборе монолита.

Прочность подъемного приспособления должна быть рассчитана с учетом веса самого высокого лизиметра. Лизиметр высотою 4 м и площадью 1,44 м^2 весит около 11 т. Прежде чем оборудовать площадки, целесообразно завершить оборудование пьезометров.

В целях создания плотного соприкосновения стенки лизиметра и монолита зазор между ними заливается горячим битумом.

Перечень и объем лизиметрических наблюдений

После оборудования площадки необходимым количеством лизиметров и приборов осуществляются режимные наблюдения по ним, которые по содержанию подразделяются на основные, связанные непосредственно с лизиметрами, и вспомогательные, проводимые в целях изучения факторов, влияющих на процесс испарения и инфильтрации. Лизиметрические наблюдения ведутся из диспетчерской будки утром и вечером по тарированной емкости приборов автоматического питания каждого лизиметра. Испарение между замерами вычисляется по шкале, нанесенной на емкости путем их тарирования. Каждое деление 10-литровой емкости должно соответствовать 50 г объема воды. В осенне-зимний и весенний периоды, когда обычно наряду с испарением грунтовых вод наблюдается их пополнение за счет атмосферных осадков и промывных вод, а также в период вегетационных поливов, проводятся контрольные замеры по инфильтрационной трубе лизиметра. При наличии инфильтрации инфильтрационные воды замеряют и откачивают до тех пор, пока не восстановится исходный уровень. При этом ведется контрольный замер уровня воды лизиметра по контрольной трубе, установленной в теле монолита.

Минерализация воды лизиметра должна соответствовать той величине, которая наблюдается на хлопковых массивах балансового района. Опыт воднобалансовых исследований показывает, что минерализация воды в лизиметре не должна превышать 3—7 г/л. При увеличении минерализации откачивают и доливают ирригационную воду, при уменьшении, наоборот,— минерализованные грунтовые воды. Это осуществляется один раз в неделю.

В процессе режимных наблюдений по лизиметрам, в месяц один раз, лизиметры проверяются на течь. Сопоставляются уровень воды лизиметра и уровень грунтовых вод по скважине. Если имеется течь, то по проверяемому наблюдается инфильтрация, так как грунтовые воды просачиваются в лизиметр. Если из проверяемого лизиметра расходуется бóльшее количество воды, чем из аналогичного, и уровень грунтовых вод при этом располагается ниже заданного уровня воды в лизиметре, следовательно, нарушена герметичность стенок или дна.

Наблюдения по метеоприборам осуществляются по методике, разработанной УГМС. Фенологические наблюдения являются важным звеном балансовых исследований. Они необходимы для переноса лизиметрических данных на естественные условия (Алимов, 1965). Результаты фенологических наблюдений позволяют определить переходные (редукционные) коэффициенты по зеленой и высушенной массе растений, урожайности, а также по золе после их обжига. Используя эти коэффициенты, можно производить региональную оценку испарения и инфильтрации, установить зависимость урожайности хлопчатника от глубины залегания уровня грунтовых вод. Кроме того, они позволяют произвести критическую оценку работоспособности каждого лизиметра. Это объясняется тем, что более 80% расхода влаги на испарение осуществляется путем транспирации. Фенологические наблюдения ведутся как в лизиметрах, так и на окружающем поле не реже 5 раз в месяц. При этом регистрируется начало посева, всходы растений, появление листьев, бутонизация, цветение, плодообразование, раскрытие коробочек. Определяется количество гнезд, кустов в каждом гнезде, цветков и бутонов, плодов и раскрытых коробочек, курака. Рассчитывается урожайность хлопчатника для каждого лизиметра.

Агротехнические мероприятия (которые также регистрируются) проводятся по графику, установленному хозяйством для данной местности, вносятся удобрения, применяются дефолианты и т. д. Для взвешивания зеленой, высушенной массы растений и урожая хлопчатника необходимо располагать техническими весами.

В конце вегетации производится промывка почв экспериментальной площадки и лизиметров.

Обработка и оформление результатов лизиметрических наблюдений

Лизиметрические наблюдения, как отмечено выше, по назначению подразделяются на две категории:

1) для более углубленных научно-методических исследований формирования подземных вод, имеющих зональный характер;

2) для массовых экспериментальных и региональных наблюдений за испарением и инфильтрационным питанием грунтовых вод при изучении их баланса.

Каждая выделенная категория исследований включает комплекс работ, обеспечивающих решения поставленных задач. Первая категория исследований проводится по специальной программе и решает вопросы методического характера.

На основании результатов режимных наблюдений для первой категории исследований составляются таблицы по установленным срочным замерам. Если частота замеров два раза в сутки, указываются величины каждого замера, но рядом в отдельной графе помещается суммарное значение испарения, инфильтрации и среднее значение температурного режима почв, воздуха, приземного слоя, влажности и др. за сутки. Это необходимо для определения связи суточного хода испарения с климатическими или другими факторами. Затем, через каждые пять дней результаты наблюдений суммируются, либо осредняются. В конце месяца следует вычислить суммарное значение испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод, а также среднеарифметическое значение факторов, формирующих испарение. Таким образом, в конце месяца для первой категории исследований будут составлены следующие таблицы:

1) испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод;

2) метеорологические наблюдения (температура и влажность воздуха, атмосферные осадки, направление и скорость ветра, температура, влажность и солевой режим почвогрунтов зоны аэрации и грунтовых вод);

3) фенологические показатели растений (высота, ширина кроны, количество листьев, удельная транспирационная поверхность, урожайность как зеленой, так и высушенной массы растений);

4) режим водопользования;

5) количественные показатели расхода атмосферных осадков, поливных, промывных вод, поступающих в зону аэрации и грунтовые воды, а также та часть воды, которая израсходована на испарение до проникновения в почву.

Эти таблицы наглядно показывают интенсивность влияния факторов, формирующих испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод при составлении различных хронологических графиков.

Для второй категории исследований можно ограничиться составлением таблиц основных факторов, формирующих испарение, к которым относятся атмосферные осадки, температура воздуха, влажность и засоленность почвогрунтов зоны аэрации (месячные замеры и замеры до и после поливов, атмосферных осадков пункта 2).

2. Остальные пункты (1, 3, 4 и 5) необходимы для составления баланса влаги в лизиметре и на участке. Согласно указанным пяти пунктам составляются совмещенные графики для лизиметров без растительности.

1. Изменение испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в сопоставлении с климатическими факторами. Связь с климатическими факторами и водным режимом почв для первой категории исследований наглядно отражается в графиках, построенных по результатам суточных и пятидневных замеров (осредненные величины климатических факторов, суммарного испарения и инфильтрации атмосферных осадков).

Для второй категории исследований достаточно графика по декадным и месячным данным.

2. Хронологические графики зависимости от глубины уровня воды в лизиметре. По ординате откладывается испарение, по абсциссе—время. На графике условными линиями вычерчивается испарение (желательно по месячным данным) с глубины 1,0, 1,5, 2,0 и 3,0 м.

3. Определение критических глубин испарения (рис. 11).

4. Зависимость испарения от физиологического развития хлопчатника. Они совмещаются с результатами определения редукционных коэффициентов (декадных) по зеленой и сухой массе, что облегчает выявление связи испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод с фенологическими показателями хлопчатника.

5. Зависимость испарения от минерализации воды и степени засоления монолита лизиметра. Для первой категории исследований графики желательно увязать с редукционными коэффициентами по влажности и степени засоления почвогрунтов зоны аэрации (по месячным данным).

6. Баланс влаги лизиметра (по месячным данным) дополняется балансом поливных вод (табл. 29). В них должны быть отчетливо выражены испарение и инфильтрация атмосферных осадков, поливных и промывных вод. Для лизиметров с многолетними травами (люцерна) строятся такие же графики зависимости, как и для хлопчатника, и дополнительно составляются графики зависимости испарения от физиологического роста растений по сумме пятидневных замеров. По этим графикам легко определить закономерности изменения испарения от укосов люцерны. Составленные графики дополняются данными по климатическим факторам.

Большой научный и практический интерес представляет определение величины ночных и дневных испарений и изменение ее по глубине. Для этого составляются в первую очередь таблицы суммарного значения испарения за ночные и дневные часы по пятидневным (декадным) замерам для установленных лизиметров. При этом особое внимание обращается на сроки замеров, которые устанавливаются в зависимости от долготы дня и ночи.

Согласно таблицам строятся хронологические графики изменения суммарного значения испарения за дневные и ночные часы по пятидневкам или декадам. По оси ординат откладывается испарение, по абсцисс — время. На графике должно быть нанесено

испарение для изучаемых глубин. Графики совмещаются с метеорологическими факторами (температура воздуха и др.), определенными по результатам ночных и дневных замеров.

Таблица 29

Типовая таблица баланса влаги лизиметра за 1965 г. Уровень воды в лизиметре 1,5 м от поверхности, структура грунта ненарушенная, площадь лизиметра 1,44 м (1,2×1,2 м), вид культуры—хлопчатник.

Элемент баланса, мм	Месяц												Сумма за			Урожайность, ц/га		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	невегетац. период	вегетацион. период	год	волокна	зеленой массы рас.	высушенной массы рас.
Атмосферные осадки																		
Выпало	12	25	33	45	32	13	—	—	12	27	30	57	172	229				
Инфильтрация до уровня грунтовых вод	8	17	13	21	17	3	—	—	2	11	20	20	92	112				
Испарение осадков до проникновения их в грунтовые воды	4	8	20	24	15	10	—	—	—	10	16	10	35	82	117	32	69	41
Поливные (промывные) воды																		
Подано	—	—	—	—	—	120	100	120	130	—	—	—	—	470	—	470		
Инфильтрация до уровня грунтовых вод	—	—	—	—	—	70	10	40	70	—	—	—	—	190	—	190		
Испарение до проникновения в грунтовые воды	—	—	—	—	—	50	90	80	60	—	—	—	—	280	—	280		
Испарение грунтовых вод	11	17	21	26	31	40	52	78	61	32	11	3	—	294	89	383		
Испарение атмосферных осадков, поливных (промывных вод)	4	8	20	24	15	60	90	80	60	42	27	13	—	347	96	443		
Испарение атмосферных осадков	15	25	41	50	46	142	158	121	—	74	38	16		641	185	826		

Как отмечено выше, испарение грунтовых вод при глубине 2,0 и 3,0 м больше в ночные часы, чем в дневные, при глубине

1,0 м, наоборот. При глубине уровня 1,5 м ночное и дневное испарение одинаковое. Увеличение испарения в ночное время при глубине уровня 2,0 и 3,0 м объясняется интенсивностью передачи тепла атмосферы в глубину. В дневное время происходит испарение главным образом из зоны аэрации с некоторым захватом грунтовых вод. Ночью температура воды больше температуры поверхности земли. В связи с этим происходит интенсивное капиллярное перемещение влаги из грунтовых вод в зону аэрации.

Для первой категории исследований необходимо знать изменение испарения в течение суток для разных фаз развития растений, что достигается учащенными лизиметрическими наблюдениями. Графики суточного хода суммарного испарения совмещаются с графиками хода транспирации, которая определяется хлоркобальтовой пробой Г. А. Евтушенко или методом среза объектов (Р. В. Шредер).

Результирующие лизиметрические наблюдения отражаются на графиках зависимости: испарения грунтовых вод от глубины их залегания за вегетационный и невегетационный периоды, а также за год; инфильтрации атмосферных осадков (%) от глубины залегания уровня грунтовых вод; инфильтрации поливных (промывных) вод от глубины залегания уровня грунтовых вод (%). При составлении этих графиков необходимо использовать переходные (редукционные) коэффициенты. На основе этих графиков в дальнейшем строятся карты региональной оценки испарения и инфильтрации.

Завершающий этап лизиметрических наблюдений — использование результатов наблюдений для региональной оценки испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод. В первую очередь, в зависимости от целевого задания балансовых исследований, производится районирование исследуемой территории. Выделяются контуры и граничные условия балансовых районов. Для выделения районов на основе изучения геолого-литологических условий, геоструктурных признаков, гидрогеологических и водохозяйственных условий определяются источники питания и расходования грунтовых вод и на основе их составляется балансовое уравнение. Принципиальная схема балансового районирования и уравнения для изучения водного баланса солей балансового района приведена в табл. 30. В зависимости от требований, предъявленных к балансовым исследованиям, предлагается пять принципов выделения граничных условий: геоструктурный, геолого-литологический, литологический, гидрогеологический, искусственной водонапорной системы. Последний принцип выделения балансовых районов — искусственные водонапорные системы (по Н. И. Ходжибаеву) — позволяет произвести воднобалансовые исследования для небольших территорий (от 500 до 10 000 км^2). Для каждого вида баланса приводится уравнение для их оценки.

Для реализации выдвигаемого предложения необходимо располагать специализированными картами, позволяющими произве-

Принцип выделения балансовых районов в орошаемых территориях

Принцип выбора граничных условий	Контур балансового слоя	Мощность балансового слоя	Вид баланса	Район распространения	Размеры балансового района, км²	Типовой участок распространения	Общее уравнение водно-солевого баланса для выбранного района: баланс поверхностного стока	баланс подземных вод	общий водный баланс	солевой баланс, тыс. т/год
Геоструктурный	Водоразделительная линия горных сооружений	Мезозойско-кайнозойские отложения	Общий водный баланс	Крупные артезианские бассейны краевых прогибов и межгорных впадин	от 10000 до 100000	Ферганская, Сурхандарьинская, Зарафшанская межгорные впадины и др.			$\pm \Delta B = [A - (U + \pi_r)] \cdot \Delta t$	
Геолого-литологический	Контур распространения четвертичных отложений	Четвертичные отложения	Общий водный баланс	Водонапорные системы четвертичных отложений межгорных впадин и дельты рек	от 1000 до 5000	Голодная степь, Чирчик-Ангренский бассейн, низовья Амударьи, Зарафшана, Каракалпака, и др.		$\pm \Delta H \cdot \mu = \frac{1}{\omega}\left[\left(A_{\omega} + \pi_{\omega}^{\pi}\right) - \left(U_r + \pi_c^r + D_b \pm \pi_{\pi}\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta B = \frac{1}{\omega}\left[\left(\pi_r + \pi_{\omega}^{\pi} + A\right) - \left(U + \pi_0 + \pi_c^r\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta C = \left[\left(\pi_r' \cdot \gamma_1 + \pi_{\omega}^{\pi} \gamma_2 + A\gamma_3\right) - \left(\pi_0 \gamma_4 + \pi_c^r \cdot \gamma_5\right)\right] \cdot \Delta t$
Литологический	Контур распространения покровных суглинков	Отложения до первого от поверхности выдержанного по площади водоупора	Баланс грунтовых вод и первого от поверхности субаэрального горизонта	Верхний этаж подземных вод четвертичных отложений межгорных впадин	от 1000 до 3.00	Ферганская межгорная впадина, Голодная степь, Чирчик-Ангренский бассейн	$\pm V = \frac{1}{\omega}\left[\left(\pi_r + A + D_b + \pi_{\pi}\right) - \left(U_b + \pi_0 + W\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta H \cdot \mu = \frac{1}{\omega}\left[\left(\pi_{\omega}' + \pi_{\omega} + W_{\omega}' + W_0 + A_{\omega}\right) - \left(U_r + O_H + \pi_r + D_b + D_p\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta B = \frac{1}{\omega}\left[\left(\pi_{\omega}' + \pi_{\omega} + A + \pi_r + \pi_b^{\pi}\right) - \left(U_r + \pi_0 + O_{\omega} + \pi_r'\right)\right] \Delta t$	$\pm C = \left[\left(\pi_{\omega}' \cdot \gamma_1 + \pi_{\omega} \gamma_2 + A\gamma_3 + \pi_r \gamma_4 + \pi_b^{\pi} \gamma_5\right) - \left(\pi' \gamma' + O_{\omega} \gamma^2 + \pi_c^r \gamma^2\right)\right] \Delta t$
Гидрогеологический	Зоны устойчивого неглубокого залегания уровня грунтовых вод (по Шмидту, для прогнозных условий)	Отдельные водоносные горизонты четвертичных отложений и грунтовые воды в покровных суглинках	Баланс грунтовых вод и отдельных водоносных горизонтов	Водоносный горизонт четвертичных отложений	от 1000 до 3000	Голодная степь, Ферганская межгорная впадина и др.	$\pm V = \frac{1}{\omega}\left[\left(A + \pi_r + D_b + \pi_b^{\pi}\right) - \left(U_b + \pi_0 + W\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta H \cdot \mu = \frac{1}{\omega}\left[\left(A_{\omega} + \pi_r^{\pi} + W_{\omega}' + W_0 + \pi_{\omega}\right) - \left(U_r + O_{\omega}' + \pi_c' + D_r^{\pi} + D_b\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta B = \frac{1}{\omega}\left[\left(A + \pi_r + \pi_b^{\pi} + \pi_{\omega}' + \pi_{\omega}'\right) - \left(U_r + U_b + \pi_0 + O_{\omega}' + D_b \pm \Delta^3\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm C = \left[\left(\pi_{\omega}' \gamma_1 + \pi_{\omega} \gamma_2 + A\gamma_3 + \pi_r \gamma_4 + \pi_b \gamma_5\right) - \left(\pi_0 \gamma' + O_{\omega}' \gamma^2 \pm D_b \gamma^3 \pm \Delta^3\right)\right] \cdot \Delta t$
Искусственные водонапорные системы (по Н. Н. Ходжибаеву)	Площади, подконтурные крупным каналам (коллекторам) оросительных систем	Водоносные горизонты до первого от поверхности местного водоупора	Баланс грунтовых вод	Грунтовые и ирригационно-грунтовые воды	от 50 до 1000	Центральная ветка Южно-Голодностепского канала, Сохская оросительная система и др.	$\pm V = \frac{1}{\omega}\left[\left(A + \pi_b\right) - \left(U_b + \pi_0 + W\right)\right] \cdot \Delta t$	$\pm \Delta H \cdot \mu = \frac{1}{\omega}\left[\left(A_{\omega} + W_b' + W_{\omega} + \pi_{\omega}' + \pi_{\omega}\right) - \left(U_r - \pi_r + D_p\right)\right] \Delta t$	$\pm \Delta B = \frac{1}{\omega}\left[\left(A + \pi_b + \pi_{\omega}' + \pi_{\omega}\right) - \left(U_r + U_b + \pi_0\right)\right] \Delta t$	$\pm \Delta C = \left[\left(A\gamma_1 + \pi_b \gamma_2 + \pi_{\omega}' \gamma_3 + \pi_{\omega} \gamma_4\right) - \pi_0 \gamma_5^1\right] \Delta t$

Примечание. Приходные статьи: A—атмосферные осадки; U—испарение суммарное; $\pm \Delta B$—наполнение (+) или убыль (−) влаги в балансовых районах; π_c—подземный отток; π_b—приток поверхностных вод по естественным водотокам; π_{ω}^{π}—приток подземных вод по коренным породам; π_0—отток воды по поверхностным водотокам; $\pm \Delta H$—подъем (+) или спад (−) уровня грунтовых вод; π_c^r—подземный сток по коренным породам; μ—недостаток насыщения или недостдача город над уровнем грунтовых вод по коренным породам; π_0—отток воды по поверхностным водотокам; $\pm \Delta H$—подъем (+) или спад (−) уровня грунтовых вод; π_c^r—подземный сток по коренным породам; μ—недостаток насыщения или недостдача город над уровнем грунтовых вод; A_{ω}—инфильтрация атмосферных осадков до уровня грунтовых вод; π_r^{π}—инфильтрация поверхностных вод до уровня грунтовых вод; U_r—испарение грунтовых вод; D_b—выклинивание подземных вод в русло водотоков; $\pm \pi_{\pi}$—водообмен между четвертичными и коренными породами в подошве балансового слоя; O_{ω}—отток грунтовых вод нисходящими токами в подстилающие отложения; π_b^{π}—поступление воды по ирригационным системам; $\pm V$—понижение (+) или убыль (−) поверхностных вод в балансовом районе.

Расходные статьи: U_b—испарение с водной поверхности; W—потери поверхностных вод на фильтрацию; A_{ω}—питание грунтовых вод за счет атмосферных осадков; π_{ω}^1—подземный приток из соседних участков; π_{ω}—перетекание подземных вод из нижних водоносных горизонтов восходящими токами; W_{ω}^1—питание грунтовых вод за счет фильтрации из каналов, водоемов; W_0—питание грунтовых вод за счет инфильтрации с орошаемых площадей; U_r—испарение поверхностью почвы и транспирация растительностью грунтовых вод; D_{ω}—дренажный сток грунтовых вод; $\gamma_1, \gamma_2 \cdots \gamma_5$; γ^1, γ^2 и т. д.—содержание солей в приходных и расходных элементах общего водного баланса; $\pm \Delta C$—накопление (+) или убыль (−) солей в балансовом районе; π_0^{π}—инфильтрационное питание грунтовых вод за счет вод естественных водотоков; $\pm \Delta S$—приращение или убыль солей в балансовом слое; π_{ω}^1—питание грунтовых вод за счет восходящих токов из подстилающих песчаных отложений; Δt—расчетный период.

сти за расчетный период количественную оценку каждого элемента водно-солевого баланса. Необходимо иметь карты испарения грунтовых вод, инфильтрационного питания грунтовых вод за счет атмосферных осадков, отдельно за счет поливных и промывных вод, изменения запасов грунтовых вод, количественных показателей взаимосвязи грунтовых вод с подстилающими субнапорными горизонтами, модуля дренажного стока, водоподачи и разновидностей посевных культур, размещения ирригационных и дренажных систем. Подземный приток и отток в балансовом районе определяется по известным методикам. Кроме перечисленных карт, отражающих источники питания и расходования грунтовых вод, следует располагать необходимыми материалами по естественноисторическим условиям балансового района. Эти материалы позволяют внести определенные поправки в расчеты по оценке элементов баланса грунтовых вод в районах исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние научные и экспериментальные исследования в области оценки элементов водно-солевого баланса грунтовых вод, выполненные нами в Голодной степи и других орошаемых оазисах Узбекистана, позволяют сделать следующие выводы и предложения.

1. В орошаемых районах Узбекистана, как и на всей аридной территории, вторичное засоление земель возникает в результате превышения испарения над подземным стоком. В пределах этих районов минерализованные грунтовые воды залегают неглубоко от дневной поверхности и приурочены главным образом к суглинкам и супесям, имеющим низкие фильтрационные свойства.

2. В Узбекистане основные факторы, формирующие испарение, — температура воздуха, глубина залегания уровня грунтовых вод и фазы физиологического развития растений. На хлопковых массивах величина испарения грунтовых вод при глубине залегания их уровня (за вегетационный период) 1 м составляет 4—7, 8; 1,5 м—3,3—6,7; 2 м—1,1—5,3 и 3 м—0,22—1,3 тыс. м³/га. Наибольшее испарение грунтовых вод наблюдается в Центральной Фергане, Голодной степи, Бухарском оазисе, наименьшее — в долине р. Чирчика и Зарафшана. За 1967 г. величина испарения грунтовых вод с площади 6 732,9 тыс. га. земель республики составила 341,9 м³/сек, или 107,7 км³.

Люцерна испаряет значительно бóльшее количество грунтовых вод, чем другие виды растений. В Голодной степи при глубине уровня воды 1 м величина испарения грунтовых вод люцерной первого года посева характеризуется 5 164,9 м³/га, второго года — 19 645 и третьего года 11 936 м³/га. При глубине уровня воды 1,5 м — 2 468, 35 449, 14 764 м³/га, в лизиметрах с уровнем воды 2 м— соответственно 1 620, 2 642, 1 780 м³/га. Испарение грунтовых вод естественной растительностью группы ксерофитов при глубине уровня воды 1 м за апрель — декабрь составляет 2 085, 9; 1,5 м —1 730 и 2 м—1 980,8 м³/га. На участках без растительности с засоленными почвогрунтами зоны аэрации величина испарения грунтовых вод меньше, чем на участках с естественной раститель-

ностью и при глубине уровня 1 м составляет 1 678,8 и 1,5 м — 918,4 м³/га.

3. Лизиметры, заряженные грунтами нарушенной структуры, не приемлемы для воднобалансовых исследований. Размеры испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод в них значительно отличаются при сравнении с данными лизиметров, заряженных монолитами.

В лизиметрах с нарушенной структурой грунта в силу свободного развития корневых систем растений и нарушения водно-физических свойств грунтов величина транспирации резко возрастает, также увеличивается инфильтрация атмосферных осадков, поливных и промывных вод.

4. Большое влияние на величину испарения грунтовых вод оказывают вегетационные поливы. Пополнение грунтовых вод за счет оросительных наиболее интенсивно происходит при первых поливах, проводимых на хлопковых полях Узбекистана в мае — июне. При первом поливе более 30% от поливной нормы расходуется на питание грунтовых вод, при втором поливе, проводимом в июле, грунтовые воды получают дополнительное питание (10%), третий и последующие поливы не влияют на грунтовые воды и полностью расходуются на пополнение запасов влаги зоны аэрации. Интенсивность инфильтрации поливных вод до грунтовых по мере физиологического развития хлопчатника и люцерны уменьшается. В связи с этим в орошаемых районах республики норму полива необходимо устанавливать с учетом водопотребления хлопчатником. Первый полив следует проводить с меньшей нормой, чем последующие вегетационные.

5. График изменения испарения грунтовых вод хлопчатником в течение суток имеет вид синусоиды, при глубине уровня воды 1 м с 10 до 16 час. (7. VIII. 1964 г.) испарение грунтовых вод резко возросло и достигло максимальной величины в 16 час. Далее, до 24 час. кривая испарения постепенно падает. С 24 до 2 час. следующего дня расход грунтовых вод наименьший, а с 2 до 8 час. наблюдается второй (ночной) пик значительно меньше дневного.

6. На люцерновых массивах зависимость испарения грунтовых вод от глубины залегания их уровня отличается от хлопковых массивов.

На участках первого года посева люцерны величина испарения грунтовых вод по мере увеличения глубины залегания их уровня уменьшается, второго года до глубины уровня 2 м — увеличивается, до исследованной глубины 3 м — уменьшается. На участках же третьего года посева люцерны испарение грунтовых вод по мере увеличения глубины залегания уровня их увеличивается, т. е. испарение при глубине уровня воды 1 м значительно меньше, чем при глубине залегания уровня 3 м.

7. Коэффициент корреляции между суммарным испарением, полученным методом изучения теплового баланса хлопкового поля, и режимом грунтовых вод 0,76. Данные по испарению, полу-

ченные в лизиметрах и методом теплового баланса, в основном совпадают. Поэтому для дальнейших воднобалансовых исследований целесообразно применять лизиметрический метод. Это объясняется еще тем, что данные по испарению, определяемые методом теплового баланса, характерны для исследуемой площадки со свойственной ей динамикой уровня грунтовых вод. Кроме того, метод теплового баланса не позволяет определять величину инфильтрации поверхностных вод и атмосферных осадков до грунтовых вод.

8. На рисовых полях величина суммарного испарения за год составляет 9000 м³/га, из которых около 45% — транспирация. В общем водном балансе рисового чека 3341,8 мм сброс оросительной воды составляет 81,5%, суммарное испарение — 0,6, запас влаги в зоне аэрации — 0,8 и расход воды на фильтрацию — 17,1%. Величина испарения влаги на рисовых полях, полученная различными методами, характеризуется следующими данными (мм): воднобалансовый —810, лизиметрический —914 и теплобалансовый —773 (высота растений риса 1100 мм).

9. Региональная оценка испарения грунтовых вод орошаемых территорий осуществляется на основе лизиметрических наблюдений. Для этого необходимо располагать, наряду с результатами экспериментальных исследований в лизиметрах, переходными коэффициентами. Для этого следует проводить тщательное наблюдение через каждые 5 дней за физиологическим развитием растений, от начала посева до их созревания. В состав фенологических наблюдений входят высота, ширина по кроне растений, начало всхода, бутонизация, цветение, клубнеобразование и созревание. На основе фенологических наблюдений и вычисленных переходных коэффициентов испарение грунтовых вод для естественных условий определяется путем построения графиков изменения испарения от глубины залегания их уровня.

10. Лизиметрический метод позволяет изучать не только зависимость испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод от различных факторов, но и произвести региональную оценку этих элементов для больших территорий. В 1967 г. сумма приходных статей общего водного баланса орошаемых территорий Узбекистана составила 2330,7 м³/сек. Из них грунтовых вод за счет подземного притока со стороны горных обрамлений —72,8, инфильтрации атмосферных осадков —21,3, фильтрации из ирригационных систем, естественных водотоков и орошаемых массивов —723,1 м³/сек. Эти воды расходуются путем подземного стока (27,2), испарения и транспирации (341,9), дренажного стока и выклинивания (398,7) и отбора скважинами (48,7 м³/сек).

11. За расчетный 1967 г. по большинству орошаемых районов происходило накопление грунтовых вод. Интенсивность накопления вод составляет в Голодной степи 6,6 м³/сек, Чирчик-Ангренском бассейне и Дальверзинской степи 0,3, Кермине-Кенимехском оазисе 0,01, Бухарском оазисе 0,42, Каршинской степи 3,47, Ше-

рабад-Сурхандарьинской депрессии 4,23 и дельте р. Амударьи КК АССР 2,84 м³/сек. В то же время за указанный период наблюдалось истощение грунтовых вод в Ферганской межгорной впадине на 5,33 м³/сек, Зарафшанской межгорной впадине на 1,07, Бухарском оазисе на 0,51, Каракульском оазисе на 0,19 и Хорезмском оазисе на 0,77 м³/сек.

Общее накопление грунтовых вод за 1967 г. по всем оазисам республики составило 7,8 м³/сек. В целом по большинству орошаемых районов Узбекистана в 1967 г. происходило накопление солей. Наибольшее накопление солей наблюдалось в низовьях р. Амударьи, Голодной степи, оазисах Бухарской области и Каршинской степи. Интенсивное рассоление земель отмечено в Хорезмском оазисе и Ферганской межгорной впадине.

12. Дальнейшие исследования в области изучения регионального водного и водно-солевого баланса орошаемых территорий должны быть направлены на уточнение их элементов путем типизации и выделения районов с определенными соотношениями приходных и расходных статей баланса грунтовых вод. На старо-орошаемых массивах, где гидрогеологические условия и литологический состав пород не меняются, балансовые исследования целесообразно проводить для крупных массивов, например, для зон распространения ирригационных систем II и III порядков.

13. Основной метод лизиметрических наблюдений в орошаемых районах для определения элементов питания и расхода вод — комплексный, состоящий из экспериментальных исследований по трем вариантам (типам) лизиметров. Первый тип лизиметров применяется для определения вертикального водообмена грунтовых вод при постоянном их уровне. Второй, кроме вертикального обмена, позволяет определить параметры режима грунтовых вод (величины подъема уровня грунтовых вод при поливах, промывках и атмосферных осадках, интенсивность расходования ирригационно-грунтовых вод на испарение, начало и конец водопотребления растениями оросительных и грунтовых вод, межполивной период) в зависимости от глубины залегания их уровней. С помощью лизиметров третьего типа изучается подземный приток и отток, испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод по ходу колебания их уровня.

14. К основным разделам лизиметрических наблюдений и связанных с ними мероприятий относятся:

изучение гидрогеологических условий, литологического строения и засоленности зоны аэрации, гидрохимического режима почвогрунтов зоны аэрации и грунтовых вод, водохозяйственных условий, характера распространения растительного покрова, глубины залегания и степени минерализации грунтовых вод, напорности подстилающих водоносных горизонтов, количественная оценка водно-физических свойств почвогрунтов;

выбор лизиметрических площадок, количество лизиметров, для

каждой площадки определяется в зависимости от поставленных задач;

установка лизиметров с постоянным, искусственно- и естественно-переменным уровнями воды. Количество лизиметров для каждого типа определяется с учетом естественноисторических условий и режима грунтовых вод исследуемого района. В районах орошаемого земледелия с аридным климатом, где фактор вторичного засоления обусловливается превалированием испарения над подземным стоком, необходимо на каждом выбранном лизиметрическом павильоне установить по шесть разновидностей лизиметров первого и второго типов, а также один лизиметр третьего типа. Глубина уровня воды в первых двух типах 1; 1,5; 2; 2,5; 3 и 3,5 м от поверхности. Повторность установки для всех трех типов лизиметров трехкратная;

оборудование лизиметрических павильонов диспетчерскими будками для автоматизации лизиметрических наблюдений;

установка нужных приборов и аппаратуры для изучения факторов, формирующих испарение. Состав и количество приборов определяется в зависимости от категорий исследований и поставленных задач;

проведение лизиметрических наблюдений и наблюдений по приборам и аппаратуре;

всесторонний анализ полученных полевых материалов.

Приводимая последовательность лизиметрических наблюдений общая для большинства природных зон недостаточного увлажнения. Но в каждой зоне может быть своя специфика в выполнении отдельных разделов мероприятий, а также в методическом подходе к ним. Успех решения поставленных задач в области изучения испарения и инфильтрационного питания, параметров режима грунтовых вод, подземного притока и оттока, а также режима орошения зависит от правильного проведения опыта.

15. Приемную площадь лизиметров необходимо выбрать с учетом условий посева сельскохозяйственных культур, для районов с хлопчатником при посеве квадратно-гнездовым способом 60×60 см наиболее приемлемая площадь лизиметра — 1,44 м², размер сторон 1,2×1,2 м и 1 м², размер сторон 1×1 м. Количество гнезд растений хлопчатника должно быть не менее 4. Для люцерны, почвы без растительности и естественной растительности достаточна площадь лизиметра 1 м². При выборе площади лизиметра обязательно следует учитывать севооборот.

Минерализацию грунтовых вод в лизиметрах следует поддерживать в определенном интервале плотного остатка, который был бы типичным для исследуемого района, в котором намечается определение приходных и расходных элементов водно-солевого баланса.

ЛИТЕРАТУРА

Айзенштат Б. А., Кириллова Т. Б. Сравнительная характеристика составляющих радиационного баланса полупустыни и хлопкового поля (Пахта-Арал). ДАН УзССР 1954, № 2.

Алимов М. С. Лизиметры для изучения испарения грунтовых вод. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии аридной зоны СССР. Ташкент, 1966.

Алимов М. С. Испарение грунтовых вод в Голодной степи. «Хлопководство», 1967, № 9.

Алимов М. С. О балансе подземных вод орошаемых территорий Узбекистана. «Узб. геол. ж.», 1976, № 4.

Алпатов А. М. Влагооборот культурных растений. Л., Гидрометеоиздат, 1954.

Аманов Х. А. Влияние грунтовых вод на водный режим в зоне Каракумского канала. «Хлопководство», 1962 № 12.

Анарбаев С. А., Рахимбаев Ф. М., Строкович С. Б. О методах изучения испарения и транспирации на гидрогеологических станциях Главгеологии УзССР. Материалы межведомственного совещания по проблеме изучения испарения с поверхности суши. Валдай, 1961.

Бабаев В. М. Результаты изучения испарения с поверхности почвы в западной части Ферганской долины. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Таджикистана (сб. статей). Таджикгипроводхоз. Душанбе, 1965.

Буговский А. Н. Основные закономерности испарения в степной зоне. «Иззестия АН СССР», сер. геофизич., 1956, № 3.

Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Л., 1948.

Будыко М. И., Юдин М. И., Яковлева Н. И. Испарение с орошаемых участков и испаряемость. «Метеорология и гидрогеология», 1954, № 1.

Гейнц В. А. О принципах гидрогеолого-мелиоративного районирования. «Разведка недр», 1960, № 4.

Иванов Л. А., Силина А. А., Цельникер Ю. А. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях. «Ботанический журнал», 1950, № 2.

Иоффе Я. О лизиметрических исследованиях почв на Нью-Джерской силосно-хозяйственной опытной станции (США). «Почвоведение», 1936, № 1.

Кац Д. М. Испарение грунтовых вод на орошаемых зонах пустынной зоны. Материалы межведомственного совещания по проблеме изучения испарения с поверхности суши. Валдай. 1961.

Кац Д. М. Режим грунтовых вод в орошаемых районах и его регулирование. М., 1963.

Кац Д. М. Лизиметрические исследования в засушливых районах для целей мелиорации. Материалы межведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с водной поверхности и почвы. Валдай, 1964.

Константинов А. Р. Испарение в природе. Л., 1963.

Константинов А. Р., Федорова Т. Г., Голубев В. С. Влияние различных факторов на показания испарителей, установленных на суше. Труды ГГИ, вып. 76, Л., 1960.
Коньков В. С. Испарение грунтовых вод на различной глубине залегания. «Соц. наука и техника», 1938, № 9, 10.
Костяков А. Н. Основы мелиорации. М., 1960.
Крылов М. М. К методике изучения водного баланса орошаемых районов. Ташкент, 1939.
Крылов М. М. Основы мелиоративной гидрогеологии Узбекистана. Ташкент, 1959.
Лебедев А. В. Экспериментальный метод изучения испарения грунтовых вод и их питания за счет инфильтрации атмосферных осадков в естественных условиях. В сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерн. геологии». М., 1953.
Лебедев А. В. Методы изучения баланса грунтовых вод. М., 1963.
Мирзаев С. Ш. Запасы подземных вод Узбекистана. Ташкент, 1974.
Мухамеджанов М. В. Квадратно-гнездовой способ возделывания хлопчатника в Узбекистане. Ташкент, 1956.
Попов В. Г. Почвенные испарители и лизиметры. Труды Млеевской опытной станции, вып. 20. 1959.
Пушкарев В. Ф. Изучение элементов водного баланса с помощью гидравлических испарителей. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. М., 1959.
Рабочев И. С. Элементы водного баланса орошаемых почв. «Известия АН ТуркмССР», 1955, № 3.
Роговская Н. В. Методика гидрогеологического районирования для обоснования мелиорации. М., 1959.
Роговская Н. В., Морозов А. Т. Статистический и гидродинамический анализ влияния орошения на грунтовые воды. М., 1964.
Роде А. А. Опытная установка для определения величины испарения грунтовых вод, количества осадков, достигающих их уровня. «Почвоведение», 1935, № 2.
Роде А. А. Почвенная влага. М., 1952.
Роде А. А. Метод изучения водного режима почв. М., 1960.
Сабинин Л. А. Физиология развития растений. М., 1963.
Скворцов А. А. Орошение сельскохозяйственных полей и микроклимат. Л., 1964.
Сборник научных трудов аспирантов СОЮЗНИХИ, вып. 4. Ташкент, 1964.
Сляднев А. Ф. Методы изучения баланса грунтовых вод. Ташкент, 1961.
Струзер Л. Р. Оценка погрешности существующих методов определения испарения с почвы. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда I, III. Л., 1959.
Тищенко П. В. Приборы для автоматического долива воды в лизиметры с непрерывной регистрацией испарения с почвы. Валдай, 1964.
Туляганов Х. Т. Гидрогеологические аспекты освоения целинных земель предгорий Узбекистана. Вопросы мелиорат. гидрогеологии, вып. 9, сб. ВСЕГИНГЕО. М., 1968.
Туляганов Х. Т. Гидрогеологические основы освоения земель предгорных равнин. Ташкент, 1971.
Тюрк Л. Баланс почвенной влаги (перевод с французского, ред. Л. Р. Струзера). Л., 1958.
Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л., 1953.
Урываев В. А. Влияние на показания водных испарителей их размеров и грунтов, в которых они установлены. Труды ГГИ, вып. 45. Л., 1954.
Филина Н. А. Элементы радиационного и теплового баланса хлопкового поля. Труды САГУ, новая серия, вып. VIII. Ташкент, 1954.
Филиппова А. К. Определение испарения с почвы методом водного баланса. Труды ГГИ, вып. 48/102. Л., 1955.

Ходжибаев Н. Н. Естественные потоки грунтовых вод Узбекистана. Ташкент, 1970.
Ходжибаев Н. Н. Мелиоративная гидрогеология. Ташкент, 1976.
Ходжибаев Н. Н., Алимов М. С. Региональный водно-солевой баланс Голодной степи. Ташкент, 1966.
Ходжибаев Н. Н., Алимов М. С. Региональный водно-солевой баланс оазисов Бухарской области. Сб. гидрогеологии и инженерн. геологии аридной зоны СССР, вып. II. Ташкент, 1970.
Ходжибаев Н. Н., Арипов К. М., Магдиев В. У. Гидрогеолого-мелиоративные условия Каршинской степи. Ташкент, 1975.
Шашко Д. Н. К вопросу о методике количественного учета транспирации. «Метеорология и гидрология», 1938, № 1.
Шмидт М. А. Режим грунтовых вод Узбекистана. Ташкент, 1938.
Шредер Р. Р. Наблюдение транспирации в полевой обстановке. «Вестник ирригации», 1938, № 4.
Шпота Л. А. Облегченный транспирометр Г. А. Евтушенко (Методика изготовления и правила пользования). Уч. зап. биол. почв. фак. Киргизского университета, вып. 7, 1958.
Чаповская Е. В. Лизиметрическое определение водного баланса хлопкового поля при разной глубине грунтовых вод в Гиссарской долине. «Известия АН ТаджССР», Душанбе, 1963.
Чаповская Е. В. Лизиметрическое определение водного баланса хлопкового поля при разной глубине грунтовых вод на Каралачинском массиве. Вопросы гидрогеологии и инженерн. геологии Таджикской ССР. Душанбе, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Понятие о процессах испарения и инфильтрационного питания грунтовых вод 5
Закономерность испарения и транспирация грунтовых вод в орошаемых районах 7
Тепловой баланс хлопкового поля 40
Водный баланс рисовых полей 47
Влияние изменения влаги в зоне аэрации на испарение и инфильтрационное питание грунтовых вод 52
Использование лизиметрических наблюдений для региональной оценки элементов баланса грунтовых вод 58
Обобщенный региональный водно-солевой баланс орошаемых территорий Узбекистана 70
Методика оценки элементов баланса грунтовых вод 81
Заключение 128
Литература 133

Мирзахаким Султанмуратович Алимов

ОПЫТ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ БАЛАНСА ГРУНТОВЫХ ВОД ОРОШАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ УЗБЕКИСТАНА

Утверждено к печати
Ученым советом Института ГИДРОИНГЕО

Редактор *Р. Рубан*
Технический редактор *В. Тарахович*
Корректор *Т. Кормушина*

ИБ № 665

Сдано в набор 2/IV-79 г. Подписано к печати 21/V-79 г. Р07752. Формат 60×90 1/16. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 8,8. Уч.-изд. л. 8,0 (1 вкл.) Тираж 1000. Заказ 84. Цена 1 р. 30 к.

Типография Издательства «Фан» УзССР. Ташкент, проспект М. Горького, 79.
Адрес Издательства: 700047. Ташкент, ул. Гоголя, 70.