

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

---

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А. Р. КОНСТАНТИНОВ

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ  
НОРМИРОВАНИЯ  
ОРОШЕНИЯ И ОСУШЕНИЯ

*Утверждено ученым советом института  
в качестве учебного пособия*

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД  
1983

УДК 631.6+556.13

К65

Константинов А. Р. Пути оптимизации нормирования орошения и осушения. Учебное пособие. — Л., Изд. ЛПИ, 1983, с. 78. (ЛГМИ).

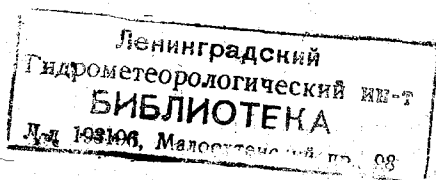
В учебном пособии рассматриваются пути оптимизации методов нормирования орошения, осушения и вопросы программирования урожайности с помощью биологических кривых водопотребления и биофизической модели формирования урожайности на мелиорируемых землях.

Пособие рассчитано на студентов гидрологической специальности гидрометеорологических институтов и университетов. Оно может быть полезно студентам гидромелиоративных вузов, а также агрономам и мелиораторам.

Табл. 4. Илл. 25. Библ. 5.

Рецензенты: кафедра гидрологии суши ЛГУ им. А. А. Жданова; А. П. Вершинин, канд. техн. наук (Государственный гидрологический институт).

© Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1983



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Широко известна та большая роль, которую играет орошаемое земледелие в повышении продуктивности сельскохозяйственного производства. Площади орошаемых земель в СССР уже в ближайшее десятилетие намечено довести до 30 млн. га. Столь обширные орошаемые массивы позволят ежегодно получать высокие урожаи в стране независимо от капризов погоды. Однако для успешной реализации этой цели необходимо решить еще многие научные и практические проблемы орошаемого земледелия.

Несмотря на большое количество работ последнего времени, связанных с исследованием микроклимата, водного режима почв и режима орошения, существующие методы определения поливного режима (главным образом, норм и сроков поливов) носят локальный (в пространстве и времени) характер, т. е. применимы, в основном, для тех условий, для которых они были получены опытным путем. Количественный учет конкретных метеорологических условий или вовсе не производится (расчеты проводятся для средних многолетних условий, либо для средnezасушливых лет), или делается это недостаточно обоснованно. Вследствие этого применяемые поливные режимы часто либо занижают необходимое растение количество воды, либо его завышают.

Как следует из [1, 2], содержание этого курса комплексное, включающее, кроме собственно гидрологии и мелиорации, еще и метеорологию и агрометеорологию. Специалисты в области мелиоративной гидрологии должны уметь решать сложные вопросы усовершенствования методов нормирования орошения и осушения.

Настоящая книга является третьей в серии учебных пособий по курсу мелиоративной гидрологии. В ней обосновываются пути оптимизации нормирования орошения и осушения.

В работе над данным учебным пособием кроме автора принимали участие: доц. А. С. Субботин, канд. геогр. наук Л. А. Досычева и Т. И. Прокофьева, канд. техн. наук В. Я. Лаховская и Н. М. Химии, инженеры И. Б. Лисовский и Л. К. Швецова.

## ВВЕДЕНИЕ

Фактическая урожайность на орошаемых полях все еще существенно ниже потенциально возможной урожайности при используемой агротехнике и при заданном плодородии почвы. До настоящего времени урожаи на поливных землях мало чем отличаются от результатов богарного земледелия и это несмотря на то, что в мелиорацию вкладываются большие средства, создана достаточно мощная производственная база. Для выполнения Продовольственной программы СССР необходимо обеспечить высокую отдачу орошаемых и осушенных земель.

Результаты исследования этого вопроса путем сравнения относительного повышения урожайности при орошении с урожайностью на богарных полях приведены на рис. 1. Для определения

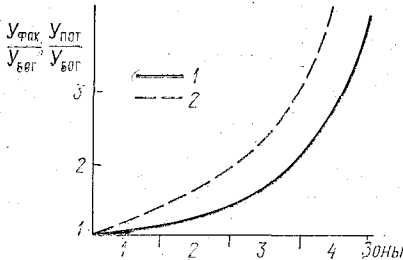


Рис. 1. Сопоставление относительного роста (по сравнению с урожайностью на богарных землях  $U_{\text{бог}}$ ) фактической  $U_{\text{фак}}$  (1) и потенциальной  $U_{\text{пот}}$  (2) урожайностей на орошаемых землях по зонам:  
1 — избыточного увлажнения (тайга);  
2 — достаточного увлажнения (лесостепь);  
3 — недостаточного или неустойчивого увлажнения (степь);  
4 — полупустыня

фактического прироста урожая были использованы данные ЦСУ, Госсортосети, областных управлений сельского хозяйства, агрометстанций и отдельных экспедиций, проводимых, в основном, научно-исследовательскими гидромелиоративными организациями и учреждениями Госкомгидромета. Всего использовано 142 случая сравнения урожайности на богарных и орошаемых землях разных зон вместе с сопутствующей гидрометеорологической и иной информацией. Разброс точек фактического прироста урожайности на орошаемых полях по зонам оказался весьма существенным; на рисунке приведена лишь средняя линия этой связи. Она показывает, что по мере роста сухости климата прибавка урожайности при орошении увеличивается с 0—20% в зоне избыточного увлажнения (таежная зона) до 20—50% в лесостепи, 50—100% в степи и 100—200% в полупустыне.

Потенциальный прирост урожайности на орошаемых полях определялся с помощью физико-статистической модели формирования урожайности (глава II). Модель учитывает влияние на урожайность климата, влагозапасов и плодородия почвы. На графиках, характеризующих связь с климатом и влагозапасами почвы, эти характеристики в условиях орошения принимались оптимальными. Соответствующая им урожайность принималась за потенциальную.

Линия роста потенциальной урожайности на рис. 1 поднимается вверх по мере роста засушливости климата более интенсивно (на 70—150%), чем для фактической урожайности на орошаемых полях. Это обстоятельство подтверждает высказанное выше суждение о существенном недоборе урожая в хозяйствах и о больших потенциальных возможностях роста урожайности на орошаемых землях. В этом кроется несомненный резерв интенсификации продуктивности мелиорируемых земель.

Одной из причин недобора урожая на орошаемых землях является недостаточно обоснованные поливные режимы, не обеспечивающие оптимальные влагозапасы почвы в разные межфазные периоды развития сельскохозяйственных культур в конкретные годы.

В учебном пособии [2] указывается, что многочисленные эмпирические формулы и другие приемы расчета оросительных и поливных режимов, пригодны лишь для тех почвенно-климатических условий, в которых они получены. Даже для этих регионов они дают существенные погрешности в годы экстремальной обеспеченности. В той же книге вскрываются «узкие места» и недостатки отечественных и зарубежных методов нормирования орошения. В настоящем учебном пособии обосновываются пути восполнения этого пробела, использующие современные достижения гидромелиоративной науки.

## **1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ КРИВЫХ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ И ОСУШИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ**

Наиболее перспективными методами нормирования орошения в настоящее время являются методы, основанные на использовании биологических кривых водопотребления сельскохозяйственных культур, предложенные А. М. Алпатьевым и развитые автором в ряде последующих работ (например [4] и др.). Как указывается в учебном пособии [2], при надежном учете влагообмена корнеобитаемой зоны с нижележащими слоями методом, основанным на биологических кривых, можно достаточно точно определить поливные и оросительные режимы с учетом фаз развития растений и

оценивать возможное снижение урожайности за счет стихийного или вынужденного отклонения влагозапасов от оптимума.

Использование биологических кривых дает возможность рассчитывать и оптимизировать не только величины и сроки поливов и водоотведения с учетом метеорологических условий конкретных лет, но также оросительные и осушительные нормы. Биологические кривые характеризуют изменение водопотребления растений. Они бывают частными (по фазам развития в зависимости от влагозапасов почвы) и общими для всего вегетационного периода (в зависимости от фаз развития растений). Общие кривые часто называются просто биологическими кривыми. Рассмотрим методику построения биологических кривых по фазам развития и для всего вегетационного периода.

### 1.1. Биофизическая модель водопотребления растений и ее определяющие факторы

В настоящее время вопрос о поливном режиме может получить рациональную количественную основу вследствие накопления достаточно большой информации об оптимальном водном режиме сельскохозяйственных культур. Эта информация получена путем обобщения экспериментальных данных, появившихся в результате измерения суммарного испарения и транспирации, а также урожайности сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических условиях.

Водопотребление растений определяется внутренними и внешними факторами их развития. Под внутренними факторами понимаются биологические свойства растений  $B$ , оказывающие влияние на режим их водопотребления. Эти свойства связаны с видом  $K$  и сортом растений  $S$ , а также фазой их развития  $\Phi$  и состоянием  $C$ .

К числу внешних факторов следует отнести погодные условия, характеризуемые испаряемостью  $E_0$ , и влагозапасы почвы  $W$ . Различные приемы агротехники оказывают лишь косвенное влияние на водный режим культурных растений путем изменения либо влагозапасов в почве, либо погодных (точнее фито-климатических) условий, либо, наконец, биологических свойств растений (путем селекции, предпосевной обработки семян и т. д.). Все эти изменения учитываются через влияние основных факторов: влагозапасов в почве, погоды и биологических свойств растений.

Многофакторная связь испарения с сельскохозяйственных полей  $E$  с определяющими характеристиками  $B$ ,  $E_0$  и  $W$  чрезвычайно усложняет производство исследований режима водопотребления растений. Поэтому прямые попытки установления количественной зависимости  $E$  с  $W$ , т. е. суммарного испарения с сельскохозяйственных полей с влагозапасами в почве, не имеют успеха. Нанесен-

ные на графики группы точек  $\bar{E}(W)$  для любой конкретной фазы развития растений порою не указывают даже тенденции этой зависимости. Для успешного исследования процесса формирования водопотребления растений необходимо уметь учитывать влияние на этот процесс каждого из перечисленных выше факторов. В общем виде связь интенсивности испарения с определяющими факторами может быть представлена как

$$E = f_1(E_0, W, B). \quad (1)$$

Прежде всего оценим влияние погодных условий на режим водопотребления растений. Одним из проявлений влияния погоды на условия произрастания являются осадки  $H$ . Они учитываются обычно через влагозапасы почвы. Другой стороной влияния погодных факторов на режим водопотребления растений является иссушающее действие приземных слоев воздуха. Наиболее физически обоснованным и практически удобным параметром, характеризующим иссушающее влияние погодных условий на величину испарения с сельскохозяйственных полей, является величина испаряемости  $E_0$ .

В ряде работ показано, что водопотребление сельскохозяйственных культур прямо пропорционально испаряемости. Вследствие этой пропорциональности величину  $E_0$  в (1) можно вынести за скобки в качестве множителя. Это вполне строго при отсутствии выраженной корреляционной связи между величиной  $E_0$  и влагозапасами почвы  $W$ , а также биологическими свойствами растений  $B$ . Соответствующий анализ показал, что значимая корреляционная связь между  $E_0$  и  $B$  отсутствует.

Наблюдается тенденция к корреляционной связи между  $E_0$  и  $W$  (коэффициент корреляции  $r = 0,0 \div 0,3$ ). Неучет этой столь слабой связи может внести ошибку в расчеты величины водопотребления до 4%, что обычно лежит в пределах точности расчетов. Для орошаемых полей, где влагозапасы почвы, независимо от  $E_0$ , искусственно поддерживаются оптимальными, значимая связь между  $E_0$  и  $W$  вовсе отсутствует. Таким образом, для конкретных погодных условий, характеризуемых величиной  $E_0$ , имеем

$$E = E_0 f_2(W, B). \quad (2)$$

Чтобы исключить влияние на водопотребление различий погоды, следует привести величины  $E$  к одинаковой испаряемости, принятой за среднюю, т. е. к  $\bar{E}_0(t) = f_3(t)$ . Ход зависимости величины  $\frac{E}{E_0}$  от влагозапасов почвы, используемый во многих работах, для всех фаз развития обычно подобен. Такая зависимость недостаточно наглядна и не указывает на различие абсолютных величин водопотребления культур, столь резко меняющихся в процессе

онтогенеза. Поэтому для одновременной характеристики абсолютной  $E$  и относительной  $\frac{E}{E_0}$  величин испарения в предлагаемой методике водопотребление приводится к условному среднему сезонному ходу испаряемости  $\bar{E}_0 f_3(t)$  (табл. 1). Основой для выбора  $\bar{E}_0(t)$  послужил средний многолетний сезонный ход испаряемости в зоне достаточного увлажнения ( $H \approx E$ ). Эта зона выбрана потому, что принятые условные значения испаряемости могут быть использованы при расчетах кроме оросительных еще и осушительных мероприятий в зоне избыточного увлажнения.

Таблица 1

Условный сезонный ход средней испаряемости  $\bar{E}_0$  мм/сут

Декада	М е с я ц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1-я	0,9	1,3	2,2	3,8	4,8	5,2	5,4	5,3	5,0	4,0	2,1	1,0
2-я	0,9	1,7	2,8	4,2	5,0	5,3	5,4	5,2	4,7	3,5	1,6	0,9
3-я	1,0	1,8	3,3	4,6	5,2	5,4	5,4	5,2	4,4	2,8	1,2	0,9

Следует здесь же подчеркнуть, что от выбора условного хода  $\bar{E}_0(t)$  не зависит ни точность построения биологических кривых, ни точность расчета фактического водопотребления, поскольку переход от экспериментальных данных  $E_{изм}$  к биологическим кривым  $E_0(W, \Phi)$  и обратно (от биологических кривых к расчетному водопотреблению) осуществляется прямым и обратным действием с помощью одного и того же значения  $\bar{E}_0$ .

При расчете величины водопотребления, приведенной к одинаковым погодным условиям  $E_{\bar{E}_0}$ , значение суммарного испарения за анализируемый период  $E$  умножается на отношение средней испаряемости  $\bar{E}_0$  к испаряемости за данную декаду или фазу  $E_0$ , т. е.

$$E_{\bar{E}_0} = \frac{\bar{E}_0}{E_0} \cdot E = \frac{\bar{E}_0}{E} f_2(W, B), \quad (3)$$

где индекс  $\bar{E}_0$  означает, что величина  $E$  приведена к средним (стандартным) погодным условиям, характеризуемым величиной  $\bar{E}_0 = f_3(t)$  (табл. 1). С величиной  $E_{\bar{E}_0}$  мы и будем ниже иметь дело.



## 1.2. Связь водопотребления растений с влагозапасами почвы и биологическими особенностями сельскохозяйственных культур

Водопотребление растений считается равным суммарному испарению  $E_c$ , состоящему из транспирации растений  $E_r$  и испарению с поверхности почвы между стеблями растений  $E_d$ . Последнее при развитом травостое составляет 10—30% от суммарного испарения и зависит от фазы развития растений и средней температуры воздуха за отдельные межфазные периоды. Для пшеницы график отношений  $\frac{E_d}{E_c}$ , построенный по данным наблюдений на почвенно-испарительных площадках для ЕТС, приведен на рис. 2. Величина отношения  $\frac{E_d}{E_c}$  зависит от фазы развития растений и от средней температуры воздуха за межфазный период. Форма зависимости испарения с почвы от ее влагозапасов уже была рассмотрена (рис. 3 в работе [2]).

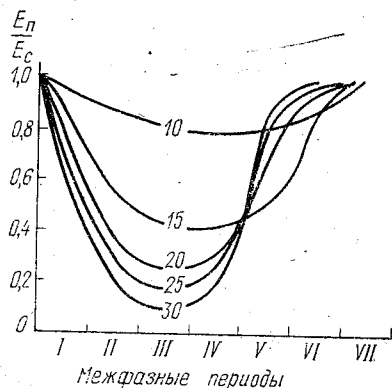


Рис. 2. Изменение отношения испарения с почвы  $E_d$ , затененной растениями, к суммарному испарению  $E_c$  с пшеницы в зависимости от температуры воздуха по межфазным периодам:

I — всходы-кущение; II — выход в трубку; III — колошение; IV — цветение; V — молочная спелость; VI — восковая спелость; VII — полная спелость

Как указывалось в [1], водопотребление растений более правильно связывать не с полными, а с продуктивными влагозапасами  $W$  почвы, представляющими собою разность между измеренными влагозапасами и влагозапасами при влажности завядания  $W_{зав}$ , ниже которых вода перестает поступать в корневую систему растений. Только эта часть почвенной влаги может быть использована растениями. Продуктивные влагозапасы удобнее выразить не в мм слоя воды, а в процентах от наименьшей полевой влагоемкости  $W_{нв}$ ,

$$W = \frac{W - W_{зав}}{W_{нв} - W_{зав}} \cdot 100 [\%]. \quad (4)$$

Такое выражение влажности почвы учитывает разную доступность воды для растений при одних и тех же продуктивных влагозапасах легких и тяжелых почв, так как  $W_{\text{нв}}$  песка и супеси, где вода более доступна, меньше, чем в глине и суглинках.

Из выражения (3) следует, что величина  $E_{\bar{E}_0}$  зависит от биологических свойств культуры и влагозапасов в почве. Биологические свойства в свою очередь зависят от вида культуры  $K$ , сорта  $S$ , фазы развития  $\Phi$  и состояния растений  $C$ , т. е.

$$B = f_4(K, S, \Phi, C). \quad (5)$$

Для приведения связи  $E_{\bar{E}_0}$  с  $W$  к одинаковым биологическим свойствам следует положить  $K = \text{const}$ ,  $S = \text{const}$ ,  $\Phi = \text{const}$ ,  $C = C_{\text{ср}}$ , т. е. строить эти связи для среднего состояния одной и той же культуры, сорта и фазы ее развития, так как качественно, вследствие стадийного развития растений, процесс транспирации для данной культуры в течение одной и той же фазы остается в первом приближении постоянным. Таким образом,

$$\bar{E}_{E_0} = f_5(W, \Phi). \quad (6)$$

Примерный вид зависимостей  $\bar{E}(W, \Phi)$  для озимой пшеницы был приведен на рис. 6 в [2]. Наименьшее водопотребление растений характерно для начальных и конечных фаз развития растений, наибольшее — для фаз с максимальным приростом растительной массы, в период которых обычно начинают формироваться репродуктивные органы растений. Максимальное водопотребление в осенний период (посев — прекращение вегетации) наблюдается при продуктивных влагозапасах  $W_{\text{опт}}$  около 75% от  $W_{\text{нв}}$ , в период возобновления вегетации — выход в трубку — при 100%, выход в трубку — колошение — 65% и колошение — восковая спелость — 45% от  $W_{\text{нв}}$ . Такой ход  $W_{\text{опт}}$  обусловлен адаптацией водопотребления озимой пшеницы (как и других культур) к средним условиям ее становления как культуры в прошлом. При недостаточных и избыточных влагозапасах водопотребление суходольных растений снижается. Скорость нарастания и «плавность» кривой (т. е.

$\frac{\partial E_{E_0 B}}{\partial W}$ ) вблизи максимума интенсивности водопотребления для различных фаз различна.

Особо следует остановиться на причинах снижения интенсивности водопотребления (на 10—40%) при избыточных влагозапасах. Непосредственной причиной снижения являются нарушения аэрации почвы, что обуславливает угнетение суходольных растений. Этот эффект при кратковременном переувлажнении мало заметен, а при длительном (в течение целого межфазного периода)

суходольные растения существенно сокращают транспирацию, травостой при этом в основном лишь затеняет почву, сокращая с нее испарение. Уточнение хода кривых  $E(W, \Phi)$  при больших влагозапасах наиболее важно для зоны избыточного увлажнения, в том числе и Нечерноземья, где вопрос стоит, главным образом, об осушении или о двустороннем регулировании влагозапасов почвы.

Из сказанного выше и формулы (6) следует, что выражение для расчета водопотребления сельхозкультур  $E_{\text{расч. } i}$  за конкретные межфазные периоды  $\Phi_i$  при наличии данных об относительных влагозапасах почвы  $W_i$  и биологическом коэффициенте водопотребления  $E_{\bar{E}_0}$  может быть представлено в виде

$$E_{\text{расч. } i} = E_{\bar{E}_0, i} \frac{E_{0, i}}{\bar{E}_0(\tau_i)} = \frac{E_{0, i}}{\bar{E}_0(\tau_i)} f_5(W_i, \Phi_i), \quad (7)$$

где  $i$  — расчетный межфазный период;  $f_5(W_i, \Phi_i)$  — значение биологического коэффициента  $E_{\bar{E}_0, i}$ , снятое с рис. 6 в [2] по выбранному межфазному периоду  $\Phi_i$  и влагозапасам почвы  $W_i$ .

За оптимальные влагозапасы обычно принимается такая влажность почвы, которая обеспечивает максимальное водопотребление культур. Это положение подтверждается многочисленными экспериментальными данными, полученными физиологами, агрометеорологами, гидрологами и специалистами смежных дисциплин. Иначе и не могло быть. Вода, проходящая в процессе транспирации через клетки растения, доставляет последнему минеральное питание. Достаточное обводнение клеток способствует нормальному регулированию термического режима растений, что обуславливает оптимальные условия для фотосинтеза, а также защиту растения от иссушающего действия атмосферы и его перегрева за счет воздействия прямой солнечной радиации. Только при условии максимального водопотребления, не ограниченного ни недостатком, ни избытком влаги в почве, мы можем ожидать максимальный урожай.

Из сказанного следует, что оптимальные влагозапасы, соответствуют максимальному водопотреблению. Аналитически для каждой фазы это положение может быть представлено выражением, используемым для отыскания экстремума функций

$$\frac{\partial E_{\bar{E}_0, B}}{\partial W} = 0. \quad (8)$$

Его решение относительно  $W$  даст величину  $W_{\text{опт}}$ . На графике (рис. 3) величина  $W_{\text{опт}}$  может быть определена как абсцисса точки на кривых  $E_{\bar{E}_0, B} = f_5(W, \Phi)$  с максимальным значением ординаты.

Анализ значений  $W_{\text{опт}}$  показывает, что величина оптимальных влагозапасов в отдельные межфазные периоды (например, возобновление вегетации — выход в трубку) доходит до наименьшей полевой влагоемкости, однако в большинстве рассмотренных нами случаев она ниже  $W_{\text{нв}}$ , но выше или близка к влажности разрыва капилляров, ниже которой, как известно, скорость подачи воды к корневой системе заметно сокращается.

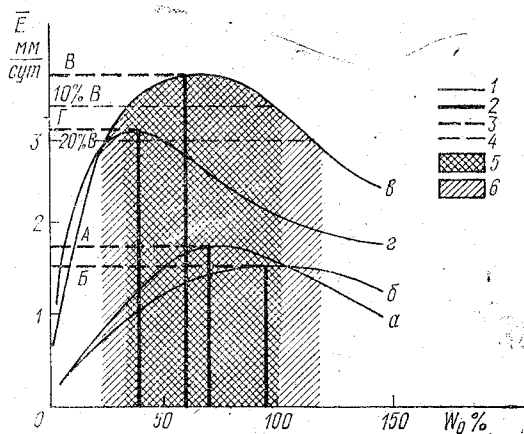


Рис. 3. Схема расчета диапазона оптимальных влагозапасов почвы озимой пшеницы по частным биологическим кривым водопотребления для межфазных периодов: посев — прекращение вегетации (а); возобновление вегетации — выход в трубку (б); выход в трубку — колошение (в); колошение — восковая спелость (г)

1 — частные биологические кривые водопотребления (для межфазных периодов); 2 — перпендикуляры, опущенные из точек максимального водопотребления, пересекающие горизонтальную ось в точках А, Б, В и Г с оптимальными влагозапасами; 3 — пунктирные линии, характеризующие максимальное водопотребление по межфазным периодам; 4 — пунктирные линии, соответствующие снижению урожайности на 10 и 20% (для межфазного периода выход в трубку — колошение); 5 — диапазон оптимальных влагозапасов с максимальным снижением водопотребления на 10% (соответствующий среднему снижению урожайности на 5%); 6 — то же соответственно на 20% и 10%

Из хода кривых  $\bar{E}_{\bar{E}_0, B}(W, \Phi)$  следует, что не только оптимальные влагозапасы, но и диапазоны изменения влажности почвы,

обеспечивающие поддержание водопотребления в заданных пределах, для разных фаз различны. Следовательно, не может быть одинакового режима орошения для различных культур и для различных фаз развития одной и той же культуры.

### 1.3. Схема расчета поливных режимов

Размер отдельного полива  $h$  может быть определен как разность влагозапасов верхней и нижней границы оптимального диапазона, т. е.

$$h = W_B - W_H \text{ [мм или } 10 \text{ м}^3/\text{га}]. \quad (9)$$

Для оценки оптимального водопотребления сельскохозяйственных культур всего вегетационного периода, включающего все фазы развития растений, строятся биологические кривые водопотребления культур. При этом для каждой фазы определяется максимальное водопотребление, соответствующее оптимальным влагозапасам в почве. Эти величины наносятся на график, по оси ординат которого откладываются величины максимального водопотребления (мм/сутки при  $W = W_{\text{опт}}$ ) за каждую фазу, а по оси абсцисс — время вегетационного периода  $t$ , с последовательным чередованием фаз развития растений. Полученная таким образом биологическая кривая водопотребления озимой пшеницы приведена на рис. 7 в работе [2]. Ее аналитическое выражение может быть представлено в виде

$$\bar{E}_{B, \max} = E_{\bar{E}_0, B, W_{\text{опт}}} = f_5(t). \quad (10)$$

На том же графике приведены кривые и для других уровней увлажнения.

Эти кривые являются устойчивой внешней характеристикой влияния биологических свойств растений на процесс их водопотребления, при оптимальных и других влагозапасах почвы. Упомянутые свойства сложились у растений на протяжении многих предыдущих лет под влиянием условий произрастания, они одинаково присущи растениям различных климатических зон как избыточного, так и недостаточного увлажнения.

Если известна кривая биологического водопотребления, то может быть определено и фактическое водопотребление данной культурой за любую фазу при оптимальных и отличных от них влагозапасах. Учитывая (3) и (10), получим

$$E_B = \frac{E_0}{\bar{E}_0} E_{\bar{E}_0, B} \text{ или } E_{B, \max} = E_{B, W_{\text{опт}}} = \frac{E_0}{\bar{E}_0} f_5(t). \quad (11)$$

Откуда для величины оптимального водопотребления имеем соотношение

$$E_{B, W_{\text{опт}}} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{E_0}{E_0} f_6(t) dt. \quad (12)$$

В формуле (12) значение функции  $f_6(t)$  представляется графически рис. 7 в [2]); величина знаменателя подынтегрального выражения  $\bar{E}_0$  представляет сезонный ход средней испаряемости, ею мы задаемся заранее (см. табл. 1). Для определения величины  $E_{B, W_{\text{опт}}}$  недостает лишь значения члена  $E_0$ , характеризующего собою фактическое сезонное изменение интенсивности испаряемости в районе орошаемого поля. Эта величина может быть определена по значению температуры  $T$  и влажности воздуха  $e$ , измеренным на метеорологических станциях.

В ряде исследований показано, что величина испаряемости с орошаемого поля зависит от его размера, который будем характеризовать коэффициентом  $k_L$ . Таким образом, величина  $E_0$  есть известная функция  $T, e, t, k_L$ , т. е.

$$E_0 = f_7(T, e, t) k_L, \quad (13)$$

причем  $k_L$  пренебрежимо мало зависит от времени. Более подробно о величине этого коэффициента сказано в параграфе 4.1.3. Общее выражение для  $E_{B, W_{\text{опт}}}$  имеет вид

$$E_{B, W_{\text{опт}}} = k_L \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{f_7(T, e, t_i)}{f_2(t_i)} f_6(t_i) dt. \quad (14)$$

Трудности подбора аналитического выражения для функции  $f_6(t)$  и особенно для функции  $f_7(T, e, t)$  заставляет использовать при определении величины максимального водопотребления культуры  $B$  за период  $t_1 - t_2$  метод суммирования по  $i$  конечным интервалам

$$E_{B, W_{\text{опт}}} = k_L \sum_{i=1}^{i=n} \frac{f_7(T, e, t_i)}{f_2(t_i)} \Delta t_i, \quad (15)$$

где  $n$  — число межфазных периодов, декад или других расчетных интервалов.

По этой формуле может быть рассчитан расход воды на испарение с орошаемого поля за любую фазу, несколько фаз или за весь вегетационный период в целом.

Перейдем к изложению методики расчета размеров и сроков отдельных поливов. Для использования этой методики необходимо знать величину влагозапасов в почве к началу сева  $W_0$ . Эта величина может быть определена одним из следующих путей.

1. Непосредственным измерением влагозапасов почвы данного поля в срок сева.

2. Путем предварительной (в течение нескольких лет) съемки весенних влагозапасов в почве разных полей. Разность влагозапасов полей обусловлена, в основном, различием инфильтрационных свойств почв и микрорельефа. По этим данным выбирается место или поле, весенние влагозапасы почв которого близки к средним влагозапасам почв полей рассматриваемого массива. Устанавливаются коэффициенты, характеризующие связь средних значений влагозапасов почв отдельных полей с влагозапасами, определенными в данном выбранном пункте или поле. В дальнейшем можно будет определять влагозапасы для всего массива лишь в одном заранее выбранном пункте или поле, а уже затем, с помощью переходных коэффициентов, определять влагозапасы других полей данного массива.

3. По данным опытных исследований, которыми установлено, что при глубоком залегании грунтовых вод (обычно ниже 2,5—3,0 м) на момент устойчивого перехода весенней температуры воздуха через  $5^\circ$ , влажность почвы близка к наименьшей влагоемкости  $W_{нв}$ . Лишь в зонах южных степей, полупустыни и пустыни величина влагозапасов почвы на эту дату может опуститься несколько ниже  $W_{нв}$ . Практически мелиораторы часто используют указанную выше закономерность для определения даты начала поливов.

4. Путем расчета весенних влагозапасов. Поэтому ниже будем считать, что величина влагозапасов в почве к моменту сева нам известна.

За период от сева до всходов влагозапасы почвы изменяются от  $W_0$  до  $W_{ве}$ . Тогда

$$W_{ве} = W_0 + H_{общ} - E - S. \quad (16)$$

где  $H_{общ} = H + h$  — общие осадки, а величина  $S$  — суммарный сток. Его значение при поливах должно равняться нулю, так как влагозапасы почвы после полива не должны превышать водоудерживающей способности (т. е. наименьшей полевой влажности), а интенсивность полива (мм/мин) не должна превосходить скорости впитывания воды в почву. Если же непосредственно после полива выпадут осадки и увлажнят почву свыше ее водоудерживающей способности, то величина суммарного стока может быть определена как разность между фактическими влагозапасами и влагозапасами при наименьшей влагоемкости (с учетом испарившейся воды

за время стока). В целом, величина стока с полей за время вегетации настолько мала, что ею почти повсеместно пренебрегают.

Величина  $E$  от схода снега до сева определяется как испарение с парового поля  $E_n$ . Ее значение может быть рассчитано либо по данным наблюдений на метеорологических станциях, либо по испаряемости и влагозапасам в почве.

Начиная с момента всходов, расходы воды на испарение с орошаемых полей определяются с помощью биологических кривых водопотребления, т. е. по формулам (14) и (15). В целях дальнейшего контроля соответствия фактических влагозапасов в почве  $W_\phi$  диапазону изменения оптимальных влагозапасов  $W_B - W_n$  за каждую пятидневку определяется величина избытка продуктивной влаги  $\Delta W_{\text{опт}}$  из условия

$$\Delta W_{\text{опт}} = W_\phi - W_n + H - E_{B, W_{\text{опт}}} \quad (17)$$

Естественно, что для нормального поливного режима величина  $\Delta W_{\text{опт}}$  должна быть больше или равна нулю, т. е.  $\Delta W_{\text{опт}} \geq 0$ . Поскольку срок очередного полива необходимо знать заранее (например, с заблаговременностью в 5 дней), то для решения вопроса о назначении срока полива, необходимо иметь возможность оценить предполагаемую интенсивность убыли влагозапасов, т. е. интенсивность водопотребления за предстоящую пятидневку. Для упрощения таких оценок можно условно считать, что расходы воды на испарение в последующую пятидневку будут в течение первой половины года (до наступления фазы максимального водопотребления) в  $\delta = 1,3$  раза больше, а второй половины года — равны расходам воды за предыдущую пятидневку ( $\delta = 1$ ). При этом предполагается, что осадки будут отсутствовать. Допущение с таким «запасом прочности» необходимо для того, чтобы избежать опускания фактических влагозапасов в почве ниже влажности  $W_n$ .

Из сказанного следует, что очередной полив надо осуществлять тогда, когда  $\Delta W_{\text{опт}}$  будет меньше или равно увеличенным в  $\delta$  раз потерям воды в почве за предыдущую пятидневку  $\Delta W_{\text{опт } i-1}$ , т. е.

$$\Delta W_{\text{опт } i} \geq \delta \Delta W_{\text{опт } i-1}$$

Размер полива, равный в общем  $W_B - W_n$  для фазы  $i$ , корректируется перед самым поливом по состоянию погодных условий и фактическим осадкам за период с момента назначения срока полива до его осуществления. Уточненный размер полива определяется из очевидного соотношения

$$h = W_{B, i} - W_{n, i} - \Delta W_{\text{опт}, i} = W_{B, i} - W_{n, i} - \Delta W_{\text{опт}, i-1} + H_i - E_i \quad (18)$$

где  $i$  — означает номер последней перед поливом пятидневки.



Срок полива, таким образом, определяется с точностью до 2—3 дней, с заблаговременностью до 5 дней. После полива влажность почвы должна достигнуть величины  $W_B$  для данной фазы, а значение  $\Delta W_{\text{опт}}$  должно равняться величине разности  $W_B - W_H$ .

После этого расчет величины и срока очередного полива начинается сначала, т. е. опять по пятидневкам рассчитывается величина избытка оптимальных влагозапасов  $\Delta W_{\text{опт}, i}$  по формуле (17). Эта величина после расчетов для каждой пятидневки сопоставляется с величиной  $\delta \Delta W_{\text{опт}, i-1}$  за предыдущую пятидневку и т. д.

Эта сравнительно новая методика проходила обширную проверку. Как авторская проверка методики (1965—1968 гг.), так и под руководством Центральной методической комиссии Госкомгидромета (1969—1972 гг.), осуществляемая на полях УССР, МССР и юга РСФСР путем сопоставления измеренных и рассчитанных величин влагозапасов метрового слоя почвы, дала положительные результаты. Вероятное отклонение составило 15 мм, а коэффициент корреляции — свыше 0,9, кривая распределения разностей сопоставляемых влагозапасов симметричная. Методика рекомендована для расчета норм и сроков полива кукурузы, яровой и озимой пшеницы, картофеля и винограда.

#### 1.4. Методика расчета оросительных норм и пример ее реализации для ЕТС

Перейдем к методике расчета оросительных норм  $M$ , т. е. к расчету среднего многолетнего дополнительного слоя воды, за вегетационный период, обеспечивающего оптимальные влагозапасы в почве. Величина максимального водопотребления отдельных культур в различных климатических условиях за вегетационный период  $E_{B, W_{\text{опт}}}$ , как указывалось выше, может быть рассчитана по формулам (14) и (15). Величина фактического водопотребления различными культурами при средних влагозапасах в почве в данных климатических условиях  $E_{B, W_{\text{ср}}}$  может быть рассчитана по температуре и влажности воздуха с помощью методики, изложенной в [4]. Она сводится к определению средней интенсивности испарения с поверхности луга, рассчитанной по температуре и влажности воздуха<sup>1</sup>, измеренным на метеорологических станциях  $E_L(T, e)$ , и к определению величины коэффициента  $k_B(T, t)$ , позволяющего перейти от значения  $E_{L, W_{\text{ср}}}$  к величине испарения с культуры  $E_{B, W_{\text{ср}}}$ , т. е.

<sup>1</sup> В последнее время появились более точные методы расчета величины  $E_L$ , использующие дополнительные метеозаписи, измеряемые на метеостанциях [3].

$$E_{B, W_{cp}} = k_B(T, t) f_7(T, e, t). \quad (19)$$

Отсюда

$$E_{B, W_{cp}} = \int_{t_c}^{t_y} k_B(T, t) t_7(T, e, t) dt, \quad (20)$$

где  $t_c$  — средний многолетний срок сева, а  $t_y$  — срок уборки. Это выражение может быть представлено в виде сумм за отдельные межфазные периоды  $\Delta t_i$ :

$$E_{B, W_{cp}} = \sum_{t_c}^{t_y} k_B(T, t_i) f_7(T, e, t_i) \Delta t_i. \quad (21)$$

Зная потребное  $E_{B, W_{онт}}$  и фактическое  $E_{B, W_{cp}}$  водопотребление, нетрудно определить норму дефицита водопотребления  $\Delta E$  как

$$\Delta E = M = \bar{E}_{B, W_{онт}} - \bar{E}_{B, W_{cp}}. \quad (22)$$

Дефицит водопотребления  $M$  — это то дополнительное количество воды, которое нужно для поддержания влагообеспеченности растений на оптимальном уровне их водопотребления.

В общем виде выражение (22) может быть представлено как

$$\bar{h} = k_L \int_{t_c}^{t_y} \frac{f_7(T, e, t)}{f_2(t)} f_6(t) dt - \int_{t_c}^{t_y} k_B(T, t) f_7(T, e, t) dt, \quad (23)$$

а в виде конечных разностей

$$\bar{h} = k_L \sum_{t_c}^{t_y} \frac{f_7(T, e, t_i)}{f_2(t_i)} f_6(t_i) \Delta t_i - \sum_{t_c}^{t_y} k_B(T, t_i) f_7(T, e, t_i) \Delta t_i. \quad (24)$$

Все члены, входящие в эту формулу, могут быть определены по среднему многолетнему ходу температуры и влажности воздуха, измеренных на метеорологических станциях, по ходу биологической кривой водопотребления данной культуры и по размеру орошаемого поля.

Расчитаны недостатки водопотребления озимой пшеницы в межфазные периоды для средних многолетних условий на всей Европейской территории СССР (приложение 8 в работе [2]). Сумма дефицитов водопотребления за отдельные межфазные периоды представляет собой оросительную норму. Расчетные данные представлены на рис. 2 в [2].

Оросительные нормы озимой пшеницы изменяются на ЕТС от 0 до 3800 м<sup>3</sup>/га. На территории Прибалтики, Белорусской ССР, Северо-Западного, Центрального, частично Уральского районов оросительные нормы колеблются от 0 до 500 м<sup>3</sup>/га. Они увеличиваются до 1500 м<sup>3</sup>/га в лесостепной и степной части Украины, в Краснодарском и Ставропольском краях. Свыше 2000 м<sup>3</sup>/га оросительные нормы наблюдаются в некоторых областях Центрально-Черноземной полосы, в районах Среднего и Нижнего Поволжья, Кавказа и Закавказья. Более наглядное представление об оросительных нормах для озимой пшеницы по ЕТС дает карта, приведенная на рис. 2 в [2].

### 1.5. Программирование урожайности с помощью биологических кривых при оптимальных, недостаточных и избыточных влагозапасах почвы

В работе [4] рассмотрена связь урожайности с влагозапасами почвы. Показано, что урожайность за отдельные короткие отрезки вегетационного периода (фаза развития, межполивной период и т. п.) при прочих равных условиях можно принять прямо пропорциональной величине водопотребления растений. Под прочими равными условиями понимаются одинаковые: состояние растений в начале расчетного периода, почвенное плодородие, удобрения, сорт и приемы агротехники.

За более длительные промежутки времени (за несколько фаз развития или за весь вегетационный или оросительный период) урожайность в широком смысле нельзя считать пропорциональной водопотреблению, поскольку при разном увлажнении за расчетный период состояние растений может оказаться различным, в хорошо развитых фитоценозах образуется свой фитоклимат, благодаря чему на создание единицы растительной массы расходуется меньше воды, чем у менее развитых растений. Да и компоненты плодородия почвы, в том числе и удобрения, более эффективно реализуются растениями при оптимальных влагозапасах, обуславливающих максимальное водопотребление. Поэтому оросительные нормы не вполне правомерно связывать прямой пропорциональностью с величиной урожайности.

Что же касается отдельных поливов, осуществляемых в процессе вегетации растений, когда их состояние, высота, густота (а, следовательно, в первом приближении и фитоклимат) и плодородие почвы, подобны, прирост растительной массы и урожайность остаются пропорциональными расходу воды на транспирацию. Таким образом, конечную урожайность можно принять пропорциональной водопотреблению растений за каждый отдельный межфазный период, опять же при прочих равных условиях. В процессе

расчета размера вегетационных поливов постоянно этих «прочих условий» сохраняется.

Если имеется возможность поддерживать влагозапасы почвы в течение всего поливного периода оптимальными, то и конечная урожайность, в той части, в которой она зависит от условий данного межфазного периода, будет максимальной. При влагозапасах ниже или выше оптимальных водопотребление снижается, соответственно снижается и урожайность по сравнению с максимальной урожайностью.

На практике влагозапасы почвы за межполивной период трудно поддерживать постоянными. Обычно они снижаются от верхней границы диапазона оптимальных влагозапасов (сразу после полива) до нижней, при которой становится необходимым произвести очередной полив. Снижение урожайности в процентах равно процентному отношению фактического среднего водопотребления за расчетный период к максимальному водопотреблению за тот же период. Это положение остается справедливым и внутри диапазона оптимальных влагозапасов почвы (рис. 4).

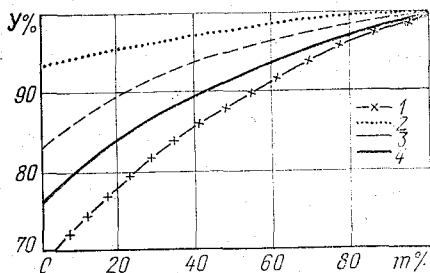


Рис. 4. Зависимость урожая от снижения поливных норм  $n\%$ :

1 — кукуруза на зерно в течение всего вегетационного периода; сахарной свеклы: 2 — за период роста листьев, 3 — роста корнеплодов, 4 — нарастания сухого вещества

В этих случаях важное значение для повышения продуктивности орошаемых полей имеет правильное определение диапазона оптимальных влагозапасов, в пределах которого влагозапасы почвы лишь минимально ограничивают водопотребление, и аэрация почвы заметно не нарушается. В большинстве рассмотренных расчетных методик, согласно экспериментальным данным, за верхний уровень оптимального диапазона принимается величина общих (в отличие от продуктивных) влагозапасов, соответствующая наименьшей влагоемкости почвы  $W_{нв}$ . За нижний уровень — влагозапасы, при которых наблюдается выраженный процесс разрыва капиллярных связей в почве, составляющие обычно 70% от  $W_{нв}$ . Разность  $W_{нв}$  и  $W_{рк}$  характеризует область оптимальных влагозапасов  $W_{опт}$ .

В более «тонких» экспериментах установлено, однако, что принятие постоянства нижней границы увлажнения не является опти-

мальным вариантом, поскольку в начале и, особенно, в конце вегетации растения успешно произрастают и при меньших общих влагозапасах (60—70% от  $W_{нв}$ ). В фазы наибольшего прироста растительной массы и цветения растения более чувствительны к ограничению влагозапасов почвы: нижняя граница оптимального диапазона поднимается при этом до величины 70—80% от  $W_{нв}$ . Если условно период вегетации разделить на три отдельных отрезка времени: начальный, средний и конечный, то влагозапасы нижней границы оптимального диапазона поддерживаются на уровне 70—80—65% или 65—75—60% от  $W_{нв}$  в зависимости от вида культуры. Такой подход несколько улучшает режим увлажнения почвы, но не делает его еще оптимальным, поскольку скачкообразное изменение влагозапасов почвы по периодам и его границы являются условными.

Задаваясь различным допустимым снижением урожайности, а тем самым и допустимым снижением водопотребления растений в различные межфазные периоды (например на 10 или 20%), можно определить диапазон оптимальных влагозапасов почвы. Он представляется отрезком на горизонтальной оси, отсекаемым двумя перпендикулярами, опущенными из точек частной биологической кривой справа и слева от максимума, соответствующих заданному снижению водопотребления (см. рис. 3).

Определенные таким образом оптимальные диапазоны продуктивных влагозапасов, например для озимой пшеницы [4], с допустимым предельным снижением урожайности на 10 и 20% равны соответственно: для периода всходы — прекращение вегетации 50—150% и 40—130%, для периода возобновления вегетации — выхода в трубку 65—125% и 40—150%, для выхода в трубку — колошения 35—100% и 25—115% и для колошения — восковой спелости 20—60% и 10—85% от  $W_{нв}$ . В ходе изменения этих диапазонов по межфазным периодам видна адаптация растений озимой пшеницы к условиям ее возделывания.

Таким способом представляется возможным оценить влияние на урожайность мелиорируемых сельскохозяйственных культур каждого отдельного межфазного или поливного периода. Если бы влагозапасы почвы были постоянно оптимальными, а водопотребление максимальным, то и урожайность была бы максимальной. Но на практике неизбежно отклонение влагозапасов почвы от оптимальных, а водопотребление — от максимального. При этом приближенное значение конечной урожайности  $Y_{кон}$ , сформировавшейся за  $n$  периодов, может быть определено из соотношения,

$$Y_{кон} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_n \cdot (a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_{n-1}) \cdot Y_{max} \quad (25)$$

или

$$Y_{\text{кон}} = Y_{\text{max}} \prod_{i=1}^{i=n} a_i, \quad (26)$$

где

$$\prod_{i=1}^n a_i = a_1^n \cdot a_2^{n-1} \cdot a_3^{n-2} \cdot \dots \cdot a_{n-1}^2 \cdot a_n = a_i^{n-i+1}. \quad (27)$$

Здесь  $a_i = \frac{E_{\text{Фак}, i}}{E_{\text{Е}_0, i}}$  — коэффициент снижения фактического водопотребления  $E_{\text{Фак}}$  за  $i$ -ю фазу (по сравнению с максимальным  $E_{\text{Е}_0}$ , см. рис. 3);  $Y_{\text{max}}$  — урожайность с данного поля при максимальном водопотреблении (см. гл. 2).

Формула (26) справедлива лишь при одинаковом влиянии каждого межфазного или межполивного периода на конечную урожайность. Это влияние зависит от продолжительности выбранного периода и его роли в продукционном процессе. Естественно, что с ростом продолжительности выбранного периода эта роль возрастает, так как при продолжительности, равной всему вегетационному периоду, величина урожайности целиком определяется условиями этого периода.

Согласно концепции П. И. Броунова о критических периодах, разные межфазные периоды даже одинаковой продолжительности вносят различный вклад в продукционный процесс. Если характеризовать влияние на конечную урожайность продолжительности периода  $\tau$  и биологической активности выбранного периода  $\beta$  коэффициентом  $b_i$ , то его величина

$$b_i = f(\beta_i, \tau_i) \quad (28)$$

может быть определена двумя путями. Для одного из них характерно построение эмпирических связей состояния растений или «вида на урожай» (см. рис. 7, гл. 2) за  $i$ -й межфазный период с подобным состоянием за  $i-1$ -й период. Пример его реализации можно найти в [4].

Второй путь связан с установлением тесноты корреляционной связи  $r$  между видами на урожай различных межфазных периодов и величиной конечной урожайности. Так как продолжительность межфазных или межполивных периодов за разные годы различная (зависит от биологических свойств растений и погодных условий), то при установлении тесноты статистической связи вида на урожай за отдельные периоды с конечной урожайностью  $Y_{\text{кон}}$ ,  $\beta_i$  и  $\tau_i$  можно условно объединить в одном коэффициенте  $b_i$ , и после этого определять тесноту его связи с конечной урожайностью.

Сумма указанных коэффициентов корреляции по всем периодам  $\sum r_i$  может оказаться и больше и меньше единицы. В таком

случае величина  $b_i$  может определяться значениями нормированных коэффициентов корреляции

$$b_i = \frac{r_i}{\sum r_i}, \quad (29)$$

а общая формула для расчета эффекта снижения урожайности  $\delta = \frac{Y_{\text{кон}}}{Y_{\text{max}}}$  из-за отклонения влагозапасов почвы от оптимальных может быть представлена в виде

$$\delta = \prod_{i=1}^{i=n} (a_i, b_i)^{n-i+1}. \quad (30)$$

В упрощенных расчетах можно приближенно полагать биологическую активность  $\beta_i$  и продолжительность  $\tau$  различных периодов вегетации одинаковыми, т. е. принимать  $b_i = 1$ . Тогда формула (30) переходит в (26).

В этом случае

$$Y_{\text{кон}} = \delta Y_{\text{max}}. \quad (31)$$

Эта формула является основной при программировании урожайности на мелиорируемых землях и оптимизации графиков поливов ушемленными нормами.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ НОРМИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ НА МЕЛИОРИРУЕМЫХ ЗЕМЛЯХ

Одной из важнейших задач дальнейшего социалистического преобразования сельского хозяйства является перевод его на индустриальную основу. При этом имеется в виду не только механизация труда в поле и на ферме, но и умение количественно оценивать экономическую эффективность различных приемов земледелия. Сделать это не просто, так как продуктивность сельского хозяйства в большей степени, чем любая другая отрасль народного хозяйства, зависит от условий погоды и климата. Засухи и суховеи, эрозия почв и пыльные бури, заморозки и градобития, заболачивание и засоление почв, а также ряд других неблагоприятных для сельского хозяйства явлений, вызванных непогодой, остаются основным бичем сельскохозяйственных полей. Так, по данным американских специалистов, ежегодные убытки сельского хозяйства США, вызванные неблагоприятными погодными условиями составляют в среднем 8 млрд. долларов.

В совокупности неблагоприятные погодные явления снижают урожайность, а ее величина сильно изменяется от года к году. В последние годы вследствие повышения уровня агротехники, обусловившего повсеместный рост урожайности, процентная изменчивость урожайности несколько снизилась, но ее абсолютная величина (в ц/га) возросла. Снижение и изменчивость урожайности затрудняют осуществление интенсивного и планомерного развития сельского хозяйства. Только мелиорация сельскохозяйственных полей способна существенно ослабить столь нежелательную изменчивость урожайности от года к году.

Связи продуктивности сельскохозяйственных полей с гидрометеорологическими факторами исследуются специальной наукой — агрометеорологией, основной задачей которой является систематическое использование сведений о гидрометеорологических процессах в целях оптимизации сельскохозяйственного производства.

Основная трудность в установлении упомянутых связей состоит в сложности и многофакторности изучаемых явлений. К обычным закономерностям физики приземного слоя атмосферы здесь прибавляются биологические свойства растений, внутрипочвенные процессы и агротехника. Для достижения успехов в этом направлении представляется необходимым проведение многоплановых комплексных экспериментальных и теоретических исследований, включая создание физико-статистических и математических моделей продукционного процесса, т. е. процесса образования биомассы.

Особенно необходим учет связи урожайности с погодой и климатом при программировании урожая. Последнее, подобно инженерным расчетам, является практическим приемом оценки комплекса антропогенных и природных факторов, необходимых растению, для создания заданного (программируемого) урожая. К числу антропогенных факторов относится предварительный выбор: культуры, сорта, агротехнических мероприятий, посевных площадей и их размещения, доз и вида удобрений и, конечно, поливных или осушительных норм и т. п. Природные факторы определяются почвенно-климатическими условиями и включают в себя естественные: почвенное плодородие, влагозапасы и температуру почвы, количество приходящей солнечной радиации, температуру и влажность воздуха, скорость ветра и т. п. Различные виды водных и тепловых мелиораций в некоторых случаях способны улучшить природные факторы, ослабить их неблагоприятное воздействие.

Программирование урожайности основывается на накопленных с годами опыте, эмпирических данных, расчетных схемах, на эмпирических, физико-статистических или теоретических моделях. Одна из таких физико-статистических моделей описывается ниже. Вследствие непосредственного учета влияния влагозапасов почвы на урожайность эта модель является удобной основой программи-



рования урожайности на мелиорируемых землях, так как позволяет установить связь количества поливной воды с обусловленной ею дополнительной урожайностью.

## 2.1. Физико-статистическая модель формирования урожайности (на примере озимой пшеницы)

### 2.1.1. Общие сведения о модели

На современном уровне знаний локальные связи урожайности с отдельными факторами, часто используемые в прошлом, не могут удовлетворить многосторонние запросы практики сельскохозяйственного производства. В то же время построение достаточно строгой теоретической модели жизнедеятельности растений, позволяющей раскрыть все многообразие связей и взаимосвязей растений со средой обитания, весьма сложно из-за недостаточной изученности этих связей. Поэтому приходится идти по пути построения физико-статистической модели, которая содержала бы количественные характеристики всех основных сторон продукционного процесса (т. е. процесса формирования биомассы), количественно выражала бы воздействие всех факторов на растение в величинах прибавки урожайности и была бы обеспечена необходимой информацией, уже накопленной к настоящему времени. Такая комплексная физико-статистическая модель «погода — почва — урожай» кратко описывается ниже.

Для агрометеорологов и мелиораторов нет необходимости специально исследовать внутренние закономерности развития растений (для них играющие роль черного ящика), приведшие к тем или иным формам биологических характеристик жизнедеятельности растений, включая процесс водопотребления, которые неизменно появляются у одних и тех же растений при подобных внешних условиях. Эта часть исследований, важных самих по себе, должна проводиться физиологами растений, агробиологами и учеными других смежных специальностей, работа которых в этом направлении должна осуществляться в комплексе с агрометеорологами и гидромелиораторами.

В [1, 4] показано, что в результате многолетних исследований в области физики приземного слоя атмосферы, разработки методов расчета испарения, тепло- и влагообмена различных поверхностей с атмосферой и водопотребления сельскохозяйственных культур, были определены основные результирующие факторы климато- и ландшафтообразования — это температура и влажность воздуха. В них, как в зеркале, отражаются изменения всех составляющих теплового и водного балансов, а вместе с ними климата, почвы и ландшафта. Тип ландшафта, определяемый совместным влиянием климата и почвы, является основной характери-

кой бонитета среды обитания растений. Наличие в природе связи типов почвы с климатом предопределяет необходимость проведения комплексного анализа связи урожайности одновременно с климатическими и почвенными условиями.

Иллюстрация и обоснование модели жизнедеятельности сельскохозяйственных культур проводится на примере анализа влияния определяющих факторов на урожайность озимой пшеницы. Эта культура выбрана потому, что она играет первостепенную роль в питании населения земного шара. Кроме того, наличие периода перезимовки делает модель наиболее общей и сложной, по сравнению с подобными моделями для других культур.

При построении модели первоначально были использованы данные 318 случаев наблюдений над озимой пшеницей на сортоиспытательных участках, для которых имелись все необходимые сведения о факторах, определяющих урожайность в течение вегетационного периода (всего учитывалось 20 факторов). Пункты измерений расположены в зоне выращивания озимой пшеницы на ЕТС: большая часть их приходится на степные и лесостепные районы. Необходимая гидрометеорологическая информация получена по данным наблюдений гидрометеорологических станций, расположенных на расстоянии не более 4 км от сортоиспытательных участков.

Средняя урожайность  $Y_{\text{ср}}$ , принятой для анализа статистической выборки составила 33 ц/га. Зная эту характеристику, величину урожайности  $Y_j$ , обусловленную влиянием  $j$ -го фактора, можно определить путем умножения средней урожайности на величину относительной урожайности  $y_j$ . Например при  $y_j = 0,76$  урожайность  $Y_j = y_j Y_{\text{ср}} = 0,76 \cdot 33 = 25$  ц/га.

Комплексная биофизическая модель «погода — почва — урожай» учитывает четыре комплексных фактора урожайности: биологические особенности культур, погодные условия, плодородие почвы и уровень агротехники. Поэтому модель состоит из четырех блоков: биологического, метеорологического, плодородия почвы и агротехники (рис. 5). Более подробное описание модели приводится в [4].

В соответствии с методом остаточных отклонений (МОО [3]) анализ связи урожайности с определяющими факторами можно производить, начиная с наиболее значимого из этих факторов. Учитывая выраженную зависимость урожайности от условий погоды и большую изменчивость погоды от года к году и внутри сезона, для большей точности анализа удобно расчеты урожайности производить начиная с учета погодных условий. Следующим по значимости учитываемым фактором следует принять плодородие почвы и затем рассматривать блок агротехники.

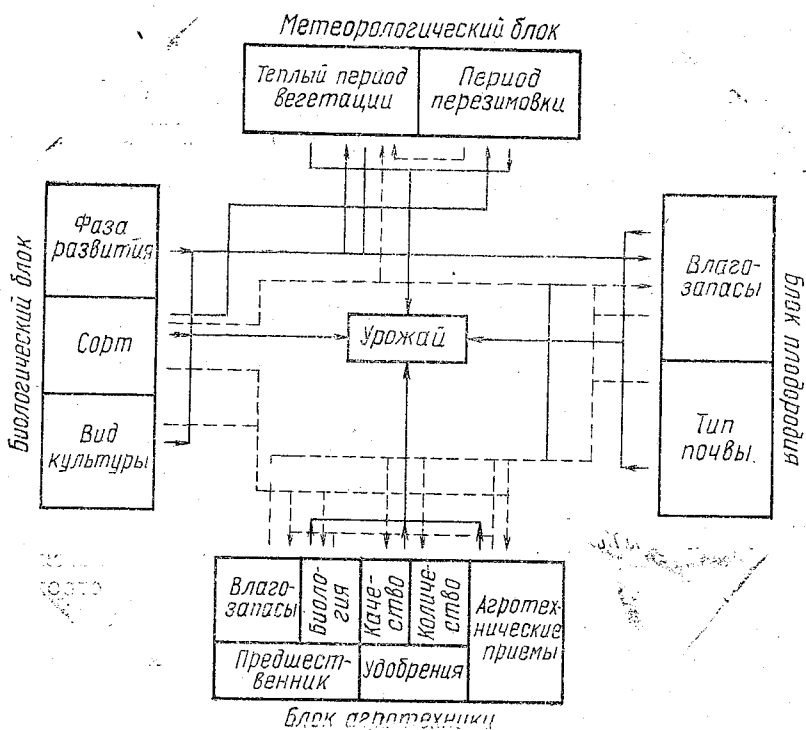


Рис. 5. Схема (модель) связи урожайности озимой пшеницы с определяющими факторами:  
 Сплошными линиями показаны прямые связи, пунктирными — косвенные

### 2.1.2. Погода теплого периода и урожайность

Под условиями погоды понимаются температура и влажность воздуха, фотосинтетически активная радиация (ФАР) и концентрация углекислого газа  $\text{CO}_2$ . Специальными исследованиями установлено, что ФАР находится в тесной связи с одновременным парным значением температуры и влажности воздуха. С этими же факторами связан суточный и сезонный ход  $\text{CO}_2$ , абсолютные значения которого зависят еще и от плодородия почвы, учитываемого отдельно. Поэтому за характеристику погодных условий принято комплексное значение температуры и влажности воздуха.

В качестве характеристики степной сухости атмосферы  $e$ , естественно, могут быть использованы величины относительной влаж-

ности  $f$  или дефицита влажности воздуха  $d$ . Принципиальной разницы между этими характеристиками не имеется.

Наличие корреляционной связи между исходными параметрами (в данном случае между  $T$  и  $e$ ) не является препятствием для использования МОО; в отличие от многих других статистических методов анализа, метод остаточных отклонений в полной мере «работает» и в этом случае.

При анализе исходных данных на координатную сетку, вдоль осей которой отложены температура  $T$  и влажность воздуха  $e$ , на-

носились измеренные величины относительной

урожайности  $y_{из} = \frac{y_{изм}}{y_{ср}}$

(рис. 6). Образуется замкнутая зона высокой урожайности  $y_{изм} > 1$ , при отклонении от которой в сторону высоких и низких температур и влажности воздуха, величина урожайности снижается. Подобные связи строились по четырем межфазным периодам: посев—осеннее прекращение вегетации, возобновление вегетации—выход в трубку, выход в трубку—колошение, колошение—восковая спелость.

Величины измеренной относительной урожайности наносились на график первого межфазного периода (рис. 6, а). В соответствии с принятой схемой анализа, на график второго межфазного периода (рис. 6, б) наносились величины

$$\Delta y_{T, e, i} = y_{изм} - y_{T, e, i}^r \quad (32)$$

где  $y_{T, e, i}^r$  — графическое значение относительной урожайности, снятое с

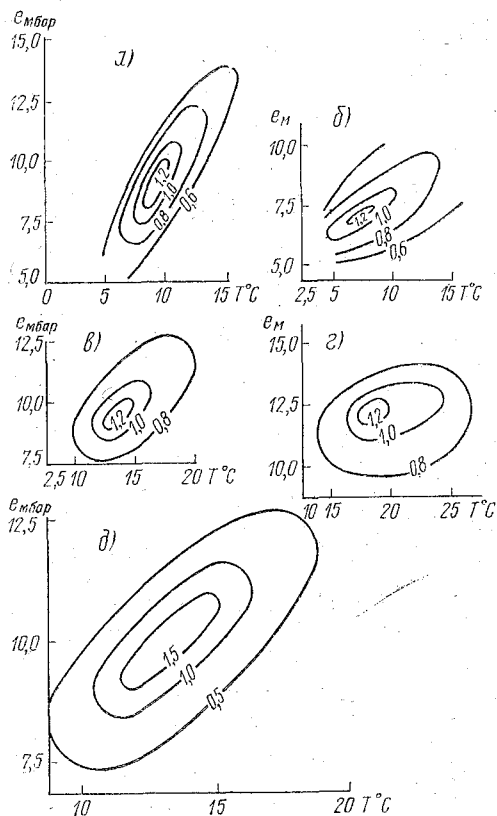


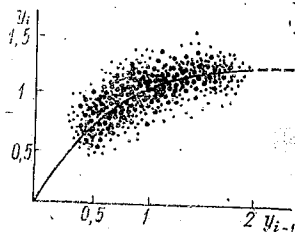
Рис. 6. Зависимость урожайности озимой пшеницы от погодных условий периода вегетации, характеризующихся температурой  $T^\circ$  и влажностью воздуха  $e$  мбар:

а — посев — прекращение вегетации; б — возобновление вегетации — выход в трубку; в — выход в трубку — колошение; г — колошение — восковая спелость; д — теплый период вегетации

изолиний, проведенных на рис. 6, а;  $\Delta y_{T, e, 1}$  — разность между  $y_{\text{изм}}$  и  $y_{T, e, 1}$ , обусловленная влиянием других, еще не учтенных факторов.

Для перевода величины  $\Delta y_{T, e, 1}$  в относительную урожайность, т. е. для выражения ее в долях от средней урожайности, к ее значению, как это сделано в [4], прибавлялась единица (полагалось, что  $y_{T, e, 1} = \Delta y_{T, e, 1} + 1$ ). В соответствии с этим, график второго межфазного периода (рис. 6, б) наносилась величина  $\Delta y_{T, e, 1}$  и определялась величина  $\Delta y_{T, e, 2}$  как разность между  $y_{T, e, 1} - y_{T, e, 2}$ , после чего определялась величина  $y_{T, e, 2} = \Delta y_{T, e, 2} + 1$ . Последняя величина наносилась на третий график (рис. 6, в), а на четвертый (рис. 6, г) —  $y_{T, e, 3} = \Delta y_{T, e, 3} + 1$ , с помощью которого определялась величина  $y_{T, e, 4}$ .

Рис. 7 Связь вида на урожай после учета условий  $i$ -го межфазного периода  $y_i$  с аналогичной характеристикой за предыдущий  $i-1$  период  $y_{i-1}$ . Крупные точки соответствуют условиям перезимовки, мелкие — всем остальным межфазным периодам



В отличие от многих других процессов, на связь прироста растительной массы и урожайности с условиями среды оказывает влияние еще и состояние растений за предыдущий межфазный период его развития. Хорошо развитое растение преумножает свой биотет в хороших условиях за последующее время и способно выдержать более жесткие условия произрастания, чем ослабленное в предыдущие периоды растение. Поэтому виды на урожай за второй межфазный период, определяемые изолиниями рис. 6, характерные для среднего состояния растений за предыдущий период, должны быть уточнены с учетом состояния растений за предыдущий период.

Для этого исправленная величина  $y'_{T, e, 1}$  связывается со значением  $y_{T, e, j-1}$ . Эта связь

$$y'_{T, e, j} = f(y_{T, e, j-1}) = k_{T, e, j}(y_{T, e, j-1}) \times y_{T, e, j} \quad (33)$$

графически представлена на рис. 7. С ростом  $y_{T, e, j-1}$ , естественно растет и  $k_{T, e, j}$ , а при  $y_{T, e, j-1} \rightarrow 0$  (что соответствует гибели урожая)  $k_{T, e, j-1} \rightarrow 0$ , т. е.  $y_{T, e, j}$  тоже стремится к нулю. При  $y_{T, e, j-1} > 0$  величина  $y_{T, e, j}$  растет более медленно, чем  $y_{T, e, j-1}$ .

Значение  $k_i$ , как уже говорилось, согласно концепции П. И. Броунова о критических периодах развития растений, по-ви-

димому, должно быть различным для разных межфазных периодов. Выбранный путь анализа в дальнейшем позволит уточнить это ключевое положение в агрометеорологии и дать его количественное выражение. В основу анализа с самого начала были положены такие межфазные периоды развития растений, которые оказывают примерно одинаковое влияние на величину конечного урожая. Поэтому и полученные значения поправочных коэффициентов  $k_j$ , определяемые с помощью рис. 7, в первом приближении оказались близкими по величине.

Расчетный урожай при последовательном учете влияния погодных условий по межфазным периодам может быть получен из уравнения

$$y_{T, e} = \sum_{j=1}^{j=4} y_{T, e, j}^r - (j-1). \quad (34)$$

Графическая связь величин относительной урожайности с погодными условиями всего теплого периода вегетации, рассчитанная по уравнению (34) и отнесенная к средним за вегетационный период значениям  $T$  и  $e$ , представлена на рис. 6,  $\delta$ . Мы видим ту же картину, что и для отдельных межфазных периодов: максимальные значения урожайности лежат в пределах температур от 10 до 14° и влажности воздуха от 8,5 до 11,5 мбар. Меньшие значения температуры характеризуют условия недостаточной теплообеспеченности, большие — избыточной. Малые значения влажности соответствуют чрезмерной сухости воздуха, а большие — избыточной влажности. Те и другие значения обуславливают угнетение растений и снижают урожайность.

Теснота связи между измеренными  $y_{T, e, j}$  и графическими  $y_{T, e, j}^r$  (снятыми с графиков путем интерполяции между изолиниями) по межфазным периодам составляет  $r_1 = 0,214 \pm 0,021$ ,  $r_2 = 0,218 \pm 0,028$ ,  $r_3 = 0,226 \pm 0,030$  и  $r_4 = 0,321 \pm 0,025$ . Высокая значимость (>99%) этих коэффициентов, полученных по выборке объемом более 300 членов говорит об их надежной обеспеченности.

Из статистики известно, что при действии  $n$  примерно равнозначных факторов, теснота связи результирующего эффекта с каждым из них близка к  $\frac{1}{n}$ . Поскольку число учитываемых факторов, определяющих урожайность, составляет около двух десятков, постольку среднее значение коэффициента корреляции должно быть близким к 0,05. Более тесные связи первых из рассмотренных факторов с урожайностью объясняются их большей значимостью и информативностью по сравнению с другими факторами, а также выбранным способом анализа, при котором к первым факторам

добавляется и косвенное влияние через них других, еще не учтенных факторов.

Естественно, что по мере увеличения числа учитываемых межфазных периодов, погодные условия которых формируют урожайность, теснота связи  $y_{T,e}^r$  с измеренным урожаем  $y_{изм}$  возрастает. Так после учета влияния погоды осеннего периода значение коэффициента корреляции между  $y_{изм}$  и  $y_{T,e,1}^r$  равно, как уже отмечалось, лишь  $0,214 \pm 0,021$ . После учета влияния первого и второго межфазных периодов  $r_{уизм, у_{T,e,1,2}} = 0,342 \pm 0,024$ , после учета влияния первого-третьего периодов  $r_{уизм, у_{T,e,1-3}} = 0,416 \pm 0,023$  и после учета влияния первого-четвертого периодов  $r_{уизм, у_{T,e,1-4}} = 0,502 \pm 0,029$ .

### 2.1.3. Плодородие почвы и урожайность

Температура и влажность воздуха, будучи результирующими параметрами климата, должны в какой-то мере характеризовать и типы почвы. Еще в 1892 г. основоположник отечественного и мирового почвоведения В. В. Докучаев писал: «Почвы и грунты есть зеркало, яркое и вполне правдивое отражение весьма тесного векового взаимодействия между водой, воздухом, землей, с одной стороны, растительными и животными организмами — с другой». И далее: «Неизбежно, что почвы наши — черноземы, подзолы, и пр. — должны располагаться по земной поверхности в строжайшей зависимости от климата, растительности и пр.». Тесная связь типов почв с климатообразующими факторами и климатом местности подчеркивалась также академиками А. А. Григорьевым, И. П. Герасимовым, В. Р. Волобуевым и многими другими исследователями.

Для подтверждения этого положения приводим графическое распределение типов почв в зависимости от средних многолетних годовых значений температуры и влажности воздуха (рис. 8). Прослеживается устойчивая связь климатических условий с типами почвы.

Климат и почва являются основными факторами ландшафтообразования, определяющего условия жизнедеятельности растений и животного мира. Поэтому график связи ландшафтных зон со средними многолетними годовыми значениями температуры и влажности воздуха получает конкретные количественные очертания (рис. 8). Области избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности — тундра и тайга, через зону достаточного увлажнения (лесостепь) переходят в зону недостаточного увлажнения — степь, полупустыню и пустыню.

Таким образом, составляющие теплового и водного баланса являются климатообразующими, почвообразующими и ландшафто-

образующими факторами. Их результирующие показатели — температура и влажность воздуха, могут быть приняты за основу количественной характеристики климата, типа почв и ландшафта. Возможность расчета влияния любой из составляющих на величину  $T$  и  $e$  позволяет оценить воздействие этих составляющих друг на друга, а также непосредственно на климат, почву и ландшафт.

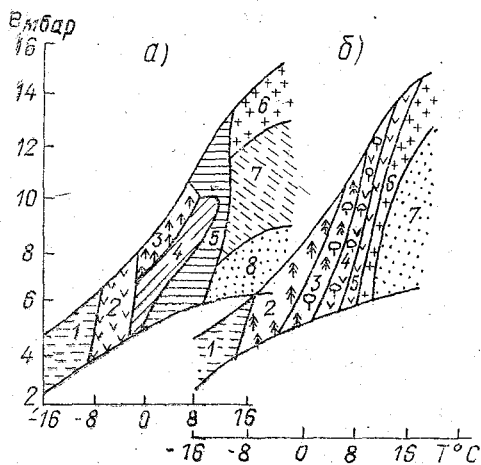


Рис. 8. Связи типа почв (а) и ландшафта (б) со средними годовыми нормами температуры и влажности воздуха;

Типы почв: 1 — тундровые; 2 — подзолистые; 3 — дерново-подзолистые; 4 — черноземы; 5 — каштановые; 6 — солончаки; 7 — серобуро-пустынные; 8 — пески. Типы ландшафта: 1 — тундра; 2 — хвойная тайга; 3 — смешанный лес; 4 — лесостепь; 5 — степь; 6 — полупустыня; 7 — пустыня

зональных в сугубо генерализованных закономерностях. Здесь теснота связи, характеризуемая коэффициентом корреляции  $r$ , доходит до 0,5—0,7. Внутри же зон эта связь сплошь и рядом нарушается (величина  $r$  снижается до 0,2—0,4) из-за влияния аazonальных факторов: различия подстилающих плодородный почвенный слой грунтов, рельефа, увлажнения, растительности.

Нарушение тесноты связи климата с почвой обуславливается также различием временного масштаба преобразований климата, ландшафта и почвы, поскольку для заметного изменения климата нужны десятилетия, ландшафта — столетия, а почвы — тысячелетия. Поэтому учет влияния на урожайность величин  $T$  и  $e$  не исключает, а подтверждает необходимость одновременного учета и плодородия почвы.

Переходя к анализу условий формирования урожайности, необходимо отметить, что наиболее полно и комплексно эти условия характеризуются типом ландшафта, аккумулирующего в себе влияние климата и почвы. Наличие связи между климатом и типом почвы казалось бы приводит к тому, что учет величин  $T$  и  $e$  означает и автоматический учет влияния на урожайность почвенного плодородия. Однако необходимо помнить, что относительно устойчивая связь климатических условий с типом почвы существует лишь в



Наличие органической связи между климатом и почвой делает неэффективным анализ влияния на урожайность климатических условий отдельно от почвенных, поскольку любая из климатических характеристик (сумма температур, осадков, гидротермический коэффициент, сельскохозяйственный бонитет климата и т. п.), оптимальное значение которой определяется из сопоставления с фактической урожайностью, одновременно автоматически привязывается и к конкретному типу почв. Она становится сугубо локальной, ее нельзя переносить на другие типы почв. Любые другие выбранные значения климатического или агроклиматического параметра, используемые при таком анализе, неизбежно относятся уже к другому типу почв. Различие в урожайности или интенсивности продукционного процесса в этих случаях обусловлено не только влиянием различных метеорологических условий, но и связано с разным плодородием почвы. Это касается не только средних многолетних условий, но и условий за конкретные годы, хотя и в меньшей степени. Тем самым снижается эффективность построения отдельных эмпирических, полуэмпирических и теоретических моделей, схем и просто связей урожайности с условиями погоды без одновременного комплексного учета плодородия почвы, ибо эти связи неизбежно становятся локальными.

Говоря о выборе количественных критериев плодородия почвы, следует прежде всего заметить, что единственным полноправным критерием плодородия почвы является обусловленная им урожайность. Понятие плодородия почвы теряет смысл, если одновременно не учитывать ее влагозапасы. Плодородие любой почвы не является ее абсолютной категорией, оно реализуется применительно к каждой конкретной культуре по-разному.

Влагозапасы почвы достаточно тесно связаны со значениями температуры и влажности воздуха, они (как, впрочем, и теплосодержание почвы) являются как бы продолжением в почве внешних климатических условий. Однако особенности водных свойств разных типов почвы и подстилающих грунтов, а также рельефа и растительности конкретных полей, обуславливают значительные отклонения их влагозапасов от средних, определяемых связью  $W$  с величинами  $T$  и  $e$ . Кроме того, адвекция нарушает связи  $W$  с  $T$  и  $e$ , тем самым предопределяет необходимость специального учета величины  $W$  как элемента плодородия почвы конкретного поля. Учет влагозапасов почвы делает модель «погода — почва — урожай» достаточно универсальной, пригодной и для полей, с выраженной адвекцией воздушных масс со стороны водоемов, болот и т. п. Это обстоятельство делает применимой рассматриваемую модель и для орошаемых массивов.

Плодородие почвы — сложное комплексное понятие. Из множества параметров почвенного плодородия (по мнению почвоведов, их более 30), характеризующих ее структуру и содержание раз-

личных элементов и микроэлементов, наиболее тесно связана с урожайностью объемная масса почвы  $Q$ . Она является результирующей характеристикой механического состава почвы, степени ее пористости, удельной массы и количества гумуса. Вместе с тем с величиной  $Q$  находится в достаточно тесной связи содержание в почве азота  $N$ , фосфора  $P$  и других элементов. Последнее обстоятельство, вместе с влагозапасами почвы, характеризует не только химические и биохимические, но и микробиологические особенности почвы, что в конечном счете и определяет ее плодородие. Все это дает основание принять величину  $Q$ , в комплексе с  $W$ , за совокупную характеристику почвенного плодородия.

Если рассмотреть распределение типов почв в природе, например при движении в пределах ЕТС с севера на юг, то можно обнаружить их закономерное чередование от дерново-подзолистых и

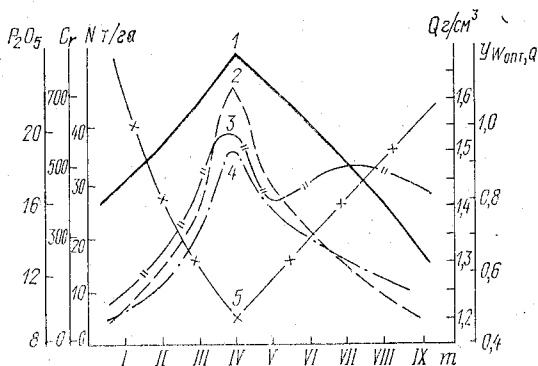


Рис. 9. Сопоставление объемной массы почвы  $Q$  г/см<sup>3</sup> (5) с ее плодородием  $Y W_{opt}, Q$  при оптимальных влагозапасах  $W_{opt}$ ,  $Q$  количеством гумуса  $C_r$  т/га (2), азота  $N$  (3) и фосфора  $P_2O_5$  (суперфосфат) (4) для различных типов почв  $m$

I — дерново-подзолистые; II — серые лесные; III — черноземы оподзоленные; IV — черноземы мощные; V — черноземы обыкновенные; VI — черноземы южные; VII — темнокаштановые; VIII — каштановые; IX — сероземы

лесных на севере, через черноземы — к каштановым почвам и сероземам на юге. Специально был проведен анализ связи урожайности с чередующимися таким образом типами почв при их оптимальном увлажнении. В результате был получен график, приведенный на рис. 9, из которого следует, что относительная урожайность (как и количество гумуса  $C_r$ , азота  $N$  и частично фосфора  $P_2O_5$ ) действительно изменяется почти обратно

пропорционально изменению объемной массы почвы. Объемная масса снижается, а урожайность растет по мере продвижения с севера на юг от дерново-подзолистых и серых лесных почв к оподзоленным и мощным черноземам, после чего  $Q$  снова возрастает, а урожайность падает. Для минерализованных почв объемная масса минимальна у типичных черноземов. Дальнейшее снижение объемной массы

говорит о наличии неразложившихся органических фракций, что характерно для органических почв, в том числе и торфа. Плодородие и урожайность таких почв снижаются.

Таким образом, значение объемной массы не однозначно определяет тип почвы, так как одинаковые  $Q$  могут иметь, например, дерново-подзолистые и каштановые, лесные и темно-каштановые почвы и т. д. Для большей определенности необходимо еще иметь сведения о степени кислотности почвы  $pH$  (солевой вытяжки). В пределах упомянутых выше почв, величина  $pH$  растет от  $\sim 4,5$  для подзолистых до  $\sim 8,0$  для сероземов. Для черноземов величина  $pH = 6,0 - 7,0$ . Поэтому слева по шкале от черноземов располагаются кислые почвы (дерново-подзолистые, серые лесные), а справа — щелочные (чернозем южный, темно-каштановые почвы и сероземы). Следовательно, для характеристики типа почвы, кроме ее объемной массы, необходимо знать степень ее кислотности или, по крайней мере, иметь сведения о том, кислая почва или щелочная. Только при этом объемная масса почвы и влагозапасы могут достаточно полно характеризовать ее плодородие.

При анализе влияния плодородия на урожайность, в соответствии с принятой схемой, используются величины урожайности с исключенным влиянием на них погодных условий (т. е. используются величины  $y_{T, e, 4} = \Delta y_{T, e, 4} + 1$ ). Анализ осуществляется по тем же межфазным периодам, что и при исследовании влияния на урожайность климатических условий. Поправка на первый межфазный период, учитывающая состояние растений за предыдущий период, как и при анализе влияния погоды, отсутствует; на второй период (возобновление вегетации — выход в трубку) величина поправки определяется условиями перезимовки  $y_{T, h}$  (где индекс  $T$  означает сумму отрицательных температур воздуха ниже  $-10^\circ$ , а  $h$  — средняя высота снежного покрова за период с этими температурами [4]), а на третий и четвертый — соответственно величинами  $y_{W, Q, 2}^r$  и  $y_{W, Q, 3}^r$ , т. е. влиянием плодородия почвы за предыдущие периоды. Как уже говорилось выше, значение поправки определяется с помощью графика, приведенного на рис. 6.

На графике связи урожайности  $y_{W, Q, i}^r$  с плодородием почвы (рис. 10) вдоль горизонтальной оси откладываются продуктивные влагозапасы  $W$  метрового слоя почвы в процентах от наименьшей влагоемкости. Вдоль вертикальных осей откладывается объемная масса того же слоя почвы, причем шкала левой оси соответствует кислым почвам, а правой — щелочным.

На рис. 10 выделяется зона оптимальной урожайности при объемной массе  $Q = 1,2 - 1,3$  г/см<sup>3</sup>, что соответствует мощным черноземам. С ростом  $Q$ , т. е. с увеличением содержания глинистых фракций почвы, урожайность, естественно, снижается. С умень-

шением  $Q$  против оптимальной урожайности также снижается вследствие чрезмерного роста неразложившихся органических остатков, свойственных торфяным почвам.

Что касается продуктивных влагозапасов почвы, то для каждого межфазного периода и типа почв, характеризуемого объемной массой, их оптимальное значение для произрастания озимой пшеницы существенно меняется.

Наибольшее значение  $W_{\text{опт}}$  наблюдается в период весеннего возобновления вегетации (90—100%). В осенний период вегетации  $W_{\text{опт}} \approx 70—80\%$ , в межфазный период выход в трубку—колошение — 60—70%, а в период созревания — всего лишь 40—50%. Минимальное значение  $W_{\text{опт}}$  наблюдается для черноземных почв; для кислых и щелочных почв оно повышается, что связано с хорошей оструктуренностью черноземов, увеличивающих подвижность, а следовательно, и доступность воды корневой системе растений.

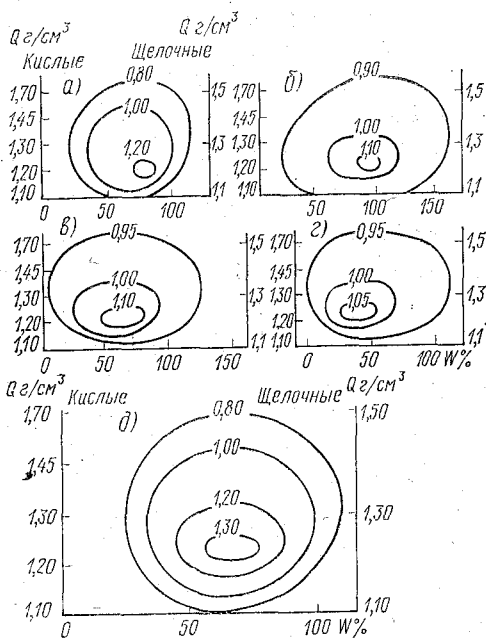


Рис. 10. Зависимость урожайности от плодородия почвы, характеризуемого ее продуктивными влагозапасами в процентах от  $W_{\text{нв}}$  и объемной массой  $Q$  г/см<sup>3</sup> (с учетом кислотности почв):

а — посев — прекращение вегетации; б — возобновление вегетации — выход в трубку; в — выход в трубку — колошение; г — колошение — восковая спелость; д — весь период вегетации

При анализе влияния на урожайность плодородия почвы так же, как и при анализе погодных условий, теснота связи рассчитанной урожайности с конечной возрастает по мере увеличения количества учитываемых фаз вегетационного периода. После учета погодных условий ( $\Delta y_{T, e, 4}$ ), как уже указывалось, коэффициент корреляции составляет 0,502. После учета  $y_{W, Q, 1}$  он возрос до  $0,598 \pm 0,040$ ,  $y_{W, Q, 2}$  — до  $0,641 \pm 0,039$ ,  $y_{W, Q, 3}$  — до  $0,686 \pm 0,044$  и  $y_{W, Q, 4}$  — до  $0,712 \pm 0,046$ . Расчет величин урожайности  $y_{W, Q}$  за

вегетационный период, обусловленный плодородием почвы, осуществляется с помощью уравнения

$$y_{W, Q} = \sum_{i=1}^{i=4} y_{W, Q, i}^{r, i} - (i-1). \quad (35)$$

Построенная связь урожайности с  $W$  и  $Q$  с учетом рН указывает на возможность получить объективную количественную характеристику степени плодородия почв по их известным диагностическим признакам. Специальный учет влагозапасов почвы делает эту модель применимой для мелиорируемых полей.

#### 2.1.4. Оценка диапазона оптимальных влагозапасов почвы с учетом ее плодородия

Модель формирования урожая с учетом влияния метеорологических факторов, почвенного плодородия, агротехники и биологических особенностей культуры может быть использована для определения диапазона оптимальных влагозапасов. И в соответствии с этой моделью после учета влияния на урожайность озимой

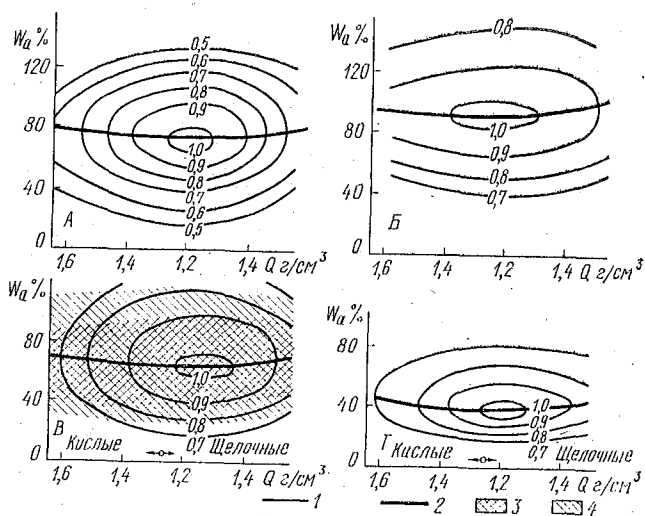


Рис. 11. Схема расчета диапазона оптимальных влагозапасов почвы (с учетом типа почвы) озимой пшеницы по межфазным периодам (см. рис. 3) по величине допустимого снижения урожайности:

1 — изолинии относительной урожайности; 2 — линии оптимальных влагозапасов; 3 — диапазон оптимальных влагозапасов при снижении урожайности на 10% от максимальной; 4 — диапазон оптимальных влагозапасов при снижении урожайности на 20% от максимальной

пшеницы погодных условий получена зависимость урожайности от плодородия почвы (характеризуемого ее объемной массой, кислотностью и продуктивными влагозапасами) по основным межфазным периодам (рис. 11).

На построенных таким образом графиках прослеживается зависимость оптимальных влагозапасов от фазы развития растений: они максимальны в весенний период, средние — в осенний и раннелетний и минимальны в позднелетний период (в период созревания). Они зависят также от типа почв.

Если задаться теми же допустимыми пределами снижения урожайности на 10 и 20%, что и на рис. 3, то для выбранных межфазных периодов соответствующие диапазоны оптимальных влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы практически совпадут с аналогичными значениями, полученными выше с помощью биологических кривых водопотребления.

Эта методика позволяет выбрать оптимальный поливной режим, обуславливающий максимальную урожайность при одновременном минимальном расходе воды на орошение. С ее помощью можно характеризовать стоимость оросительной воды в единицах урожайности, что позволяет достаточно надежно определять экономическую эффективность орошаемого земледелия.

## 2.2. Дополнительные факторы и связи, учитываемые при программировании урожайности на мелиорируемых землях

### 2.2.1. Связь урожайности с водопотреблением

В основе оптимизации поливных режимов лежит связь урожайности с продуктивными влагозапасами почвы за отдельные межфазные периоды развития сельскохозяйственных культур на мелиорируемых землях. Такие связи не только служат основой максимизации урожайности и экономии поливной воды, но и позволяют свести до минимума отрицательные последствия поливов заниженными или «ущемленными» нормами.

В основе связи оросительных норм с планируемой урожайностью ( $У$ ) лежит нередко используемая мелиораторами зависимость водопотребления  $E$  от  $У$  в виде

$$E = k_b У. \quad (36)$$

Коэффициент пропорциональности  $k_b$ , называемый коэффициентом водопотребления, определяется путем сопоставления урожайности с расходом воды за предшествующие годы. Иногда это делается отдельно для засушливых и влажных лет. Оросительные нормы при этом определяются как разность между необходимым водопотреблением и наличными влагозапасами почвы, с учетом выпадающих осадков за вегетационный период. Количество поли-

вов определяют, исходя из влагоемкости орошаемого слоя почвы, а сроки поливов приурочивают к различным фазам развития растений, исходя из средних климатических условий и накопленного опыта. Покажем ниже на типичном примере, что такая (линейная) форма связи  $E$  с  $U$  не может быть использована для расчета оросительных норм и пригодна лишь для определения поливных режимов.

На рис. 4 в работе [2] иллюстрируется связь урожайности  $U$  с относительным водопотреблением кукурузы

$$\bar{E} = \frac{E}{E_0} \cdot \bar{E}_0, \quad (37)$$

приведенным к средней испаряемости (см. табл. 1) за весь период вегетации. Здесь  $E_0$  — испаряемость, т. е. максимально возможное испарение с сельскохозяйственных полей. Оно имеет место в фазы активной вегетации при сомкнутом травостое и оптимальных влагозапасах почвы. Последние обеспечивают неограниченный подвод воды к корневой системе и не нарушают аэрацию почвы.

Пропорциональность между  $E$  и  $U$  имеет место лишь на отдельных участках кривой при малой, средней и высокой интенсивностях водопотребления, что обычно соответствует малым, средним и высоким влагозапасам почвы. Для всего отрезка средних и высоких влагозапасов почвы, что характерно для орошаемых полей, прямая пропорциональность между  $E$  и  $U$  за вегетационный период нарушается из-за разного наклона кривой, а следовательно, и разной величины коэффициента водопотребления  $k_v$  (см. 1.5).

Это происходит потому, что величина  $k_v$  зависит как от общих погодных условий, характеризуемых величиной  $E_0$ , так и от интенсивности трансформации величины  $E_0$  внутри травостоя, обусловленной фитоклиматом обитания растений. При малом и частично среднем водопотреблении (а следовательно, при малых и средних влагозапасах почвы) наземная растительная масса не получает хорошего развития, листья, как правило, не смыкаются и не полностью затеняют почву. В этом случае лучи солнца и ветер пронизывают растительный покров вплоть до поверхности почвы, увеличивая величину испаряемости внутри травостоя, благодаря чему растения испытывают недостаток воды и угнетение, снижая тем самым прирост растительной массы и урожайность. Коэффициенты транспирации и водопотребления растений в этом случае сильно возрастают.

При высоком водопотреблении (а следовательно, при влагозапасах, близких к оптимальным), когда его величина приближается к  $E_0$ , создается благоприятный микроклимат внутри сомкнутого травостоя. Коэффициенты транспирации и водопотребления сни-

жаются до минимальных значений, увеличивая продуктивность сельскохозяйственных полей на десятки и даже сотни процентов. Водопотребление в этом случае практически достигает испаряемости и выше не поднимается, тогда как урожайность растет по мере повышения уровня агротехники и почвенного плодородия.

Поскольку сами коэффициенты водопотребления зависят от погодных условий и состояния растений, постольку использование их нормативных значений (определенных для средних климатических условий) для погодных условий конкретных лет неизбежно приводит к несоответствию оросительных норм фактическому водопотреблению растений, обуславливая тем самым отклонение расчетных влагозапасов от оптимальных. Таким образом, принятие водопотребления пропорциональным урожайности не является достаточно надежным основанием для расчета оросительных норм.

По другому делу обстоит при рассмотрении связи водопотребления с приростом растительной массы за отдельные межфазные периоды. При изучении этого вопроса следует иметь в виду, что урожайность  $У$  и водопотребление  $E$  лишь при прочих равных условиях (т. е. при одинаковой погоде, состоянии и онтогенезе растений) линейно связаны между собой коэффициентами транспирации или водопотребления, характеризующими количество воды, идущее на построение единицы сухого вещества или растительной массы. В течение отдельных межфазных периодов эти прочие условия в известных пределах сохраняются, поскольку за сравнительно короткий срок (межфазный период) число стеблей и различия в площади листовой поверхности разных растений незначительно. Различными могут быть лишь влагозапасы почвы и обусловленные ими водопотребление и прирост растительной массы. Поэтому, если связывать прирост растительной массы  $\Delta M$  с водопотреблением культуры  $E$  внутри одного межфазного периода, то прямая пропорциональность между  $\Delta M$  и  $E$  в этом случае практически сохраняется.

Те же выводы можно сделать из многочисленных экспериментальных данных, полученных в различных регионах страны. Рассмотрим некоторые из этих данных более подробно. Для более детального анализа этого вопроса вернемся к рассмотрению графика связи испарения с почвы и водопотребления растений с влагозапасами почвы (рис. 4 в работе [2]). Кривую упомянутой связи можно разбить на три интервала. Начальная часть первого интервала характеризуется почти полным отсутствием испарения с иссушенной почвы: соответствующие этому интервалу влагозапасы от нулевых до максимальной гигроскопичности  $W_{\text{мг}}$ . Вторая половина первого интервала характеризуется медленным ростом испарения с увеличением  $W$  от  $W_{\text{мг}}$  до влажности завядания  $W_{\text{зав}}$ . Форма перемещения воды в почве — парообразная, переходящая при  $W_{\text{зав}}$  в пленочную.



Для второго интервала преимущественно характерен наиболее интенсивный рост испарения и водопотребления с увеличением влагозапасов почвы. В первой части этого интервала пленочное перемещение влаги при достижении влажности разрыва капилляров  $W_{рк}$  переходит в капиллярное  $W_{к}$ , при котором скорость перемещения воды в почве максимальная. С дальнейшим ростом влажности почвы интенсивность роста скорости капиллярного движения воды к поверхности почвы ограничивается испаряемостью  $E_0$ , определяемой энергетическими ресурсами тепла на поверхности почвы, расходуемого на испарение. При приближении капиллярной скорости перемещения воды в почве к  $E_0$  наступает третий период, характеризующийся постепенным, а в конце периода и полным прекращением роста интенсивности испарения с почвы и водопотребления растений с увеличением влагозапасов почвы. Именно этот третий период наиболее характерен для орошаемых и осушаемых земель.

Таким образом, нижняя граница диапазона оптимальных влагозапасов почвы  $W_{н, опт}$  наиболее тесно связана с ее влагозапасами, скорость капиллярного подъема, при которых  $u_{к}$  близка к испаряемости  $E_0$ . Эта влажность обычно несколько выше влажности разрыва капилляров  $W_{рк}$ , величину которой часто приравнивают значению  $W_{н, опт}$ . Сделанный вывод подтверждается и данными о скорости максимального капиллярного подъема для различных типов почв. Так для песчаной почвы скорость капиллярного подъема воды составляет несколько десятков миллиметров в сутки, супесчаных доходит до 10—20 мм/сутки, суглинков — до 10—12 мм/сутки; лишь для обыкновенных глин максимальная скорость капиллярного подъема опускается до 5—7 мм/сутки, а также для тяжелых — до 1—2 мм/сутки.

Максимально возможное испарение  $E_0$  в разных климатических зонах составляет в среднем 3—4 мм/сутки в зоне избыточного увлажнения, 4—6 — достаточного, 6—8 (степь) и 8—10 (полупустыня и пустыня) — недостаточного увлажнения.

Таким образом, для всех типов почв (за исключением обыкновенных и тяжелых глин) величина испаряемости ниже максимальной скорости капиллярного перемещения воды, имеющей место при  $W_{нв}$ . Это означает, что для равновесия влагозапасов увлажненного слоя почвы при орошении нет необходимости влагозапасы почвы постоянно поддерживать на уровне  $W_{нв}$ . Верхний уровень диапазона оптимальных влагозапасов почвы  $W_{в, опт}$  должен быть таким, при котором скорость капиллярного подъема воды  $u_{к} \approx E_0$ . Соответствующие влагозапасы почвы  $W_{в, опт}$  лежат обычно в пределах  $W_{рк} < W_{в, опт} < W_{нв}$ .

Приведенные выше рассуждения относятся к случаю равномерного увлажнения всего корнеобитаемого слоя. Этот момент насту-

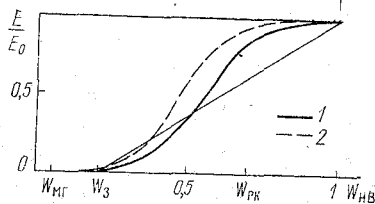


Рис. 12. Зависимость относительного испарения с сельскохозяйственных полей  $\frac{E}{E_0}$  от влагозапасов почвы  $W$ :

1 — для почвы, лишенной растительности; 2 — суммарное испарение (транспирация + испарение с почвы)

пает после того, как фронт поливной воды достигнет нижней границы корнеобитаемой зоны.

На рис. 12 приведена зависимость, аналогичная вышеописанной. Кроме зависимости  $\frac{E}{E_0}$  от  $W$  для поля, занятого сельхозкультурами, здесь приведена связь такого же вида для почвы, лишенной растительности. Из рис. 12 следует, что скорость роста водопотребления орошаемых культур выше скорости роста испарения с почвы, лишенной растительности, с увеличением влагозапасов в почве. Это объясняется действием корневой системы, способствующей, наряду с испарением с почвы, одновременному расходу на транспирацию воды со всей зоны корнеобитания. Так как сосущая сила корневой системы зависит от ее мощности, вида и фазы развития культуры, то и угол наклона кривой зависимости водопотребления (а следовательно, и урожайности) от влагозапасов почвы будет различным.

### 2.2.2. Влияние сроков выпадения и количества осадков (и поливов) на точность определения средних влагозапасов почвы

При производстве различных гидрологических, мелиоративных и агрометеорологических расчетов возникает необходимость вычисления средних влагозапасов почвы за некоторые промежутки времени. Как правило, наименьшая продолжительность этих промежутков составляет декаду, так как массовые регулярные наблюдения за влажностью почвы на сельскохозяйственных полях и водосборах проводятся через 10 дней. Для вычисления среднего за период между измерениями влагозапаса почвы обычно используется соотношение вида

$$W_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{н}} + W_{\text{к}}}{2}, \quad (38)$$

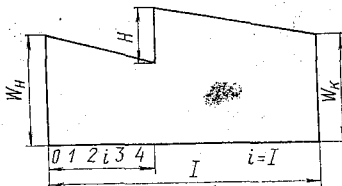
где  $W_{\text{н}}$  и  $W_{\text{к}}$  — влагозапасы на начало и конец расчетного периода.

Формула (38) предполагает линейное изменение влагозапасов и непосредственно не учитывает времени выпадения осадков за расчетный период. С целью устранения отмеченного недостатка была предложена расчетная методика, позволяющая при вычис-

лении средних влагозапасов учитывать сроки выпадения осадков  $H$  и их величину.

При выводе новых формул использовалась схема, изображенная на рис. 13. В этой схеме сделано предположение, что интенсивность уменьшения влагозапасов почвы остается неизменной в течение всего расчетного периода (т. е. одинакова до и после выпадения осадков). Такое предположение далеко не безупречно, но позволяет получить формулы, которые в первом приближении могут быть использованы для расчета средних влагозапасов за

Рис. 13. Простейшая схема учета осадков ( $W_n$  и  $W_k$  — влагозапасы на начало и конец периода  $I$ ;  $H$  — величина осадков;  $i$  — количество суток, прошедших от начала периода к моменту выпадения осадков)



периоды с осадками и тем самым дать результаты более точные, чем те, которые получаются по формуле (38). Определив средние влагозапасы как средневзвешенную величину за периоды  $i$  и  $I-i$  (где  $I$  — продолжительность расчетного периода,  $i$  — количество дней от начала периода до выпадения первых осадков), получили следующие выражения:

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k}{2} + \left( \frac{1}{2} - \frac{i}{I} \right) H. \quad (39)$$

Если за рассматриваемый период осадки выпадают  $n$  раз, то формула имеет вид

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k}{2} + \sum \left( \frac{1}{2} - \frac{i_n}{I} \right) \cdot H_n. \quad (40)$$

Из формул (39) и (40) получаем следующие зависимости:

1. При  $i=0$ , т. е. если осадки выпали непосредственно после определения начальных влагозапасов (в тот же день), формулы (39) и (40) принимают вид

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k + H}{2}. \quad (41)$$

2. При  $i=I$ , т. е. если осадки выпали непосредственно перед определением конечных влагозапасов,

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k - H}{2}. \quad (42)$$

3. При  $t = 1/2 I$ , т. е. когда осадки выпали в середине интервала,

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k}{2}. \quad (43)$$

4. При  $H=0$ , т. е. если осадки не выпадали, также получим формулу вида (38).

Выражения (41)—(43) подтверждают необходимость учета осадков, особенно при их выпадении в начале или конце выбранного интервала времени. При расчете средних влагозапасов осадки, выпавшие в начале интервала, должны добавляться к сумме начальных и конечных влагозапасов (41), а выпавшие в конце интервала — вычитаться из них. Осадки, выпавшие в середине интервала, не оказывают влияния на расчет средних влагозапасов (43). При отсутствии осадков формула (39) переходит в исходную формулу (38), где осадки не учитываются.

Формулы (39) и (40) просты для практического применения, однако положенное в основу их вывода предположение о постоянстве суточной величины испарения до и после выпадения осадков делает их недостаточно строгими.

Можно попытаться оценить влияние на средние влагозапасы одновременно двух факторов: осадков и изменчивости интенсивности испарения во времени. Поскольку в природе может быть бесчисленное сочетание величин осадков и сроков их выпадения, а также возможен самый разнообразный ход испарения (обусловленный погодными факторами), то для определенности решения поставленной задачи необходимо схематизировать рассматриваемый процесс.

Построим несколько моделей хода влагозапасов, считая, что заданы начальные и конечные влагозапасы, величины осадков и сроки их выпадения, а также интенсивность испарения. Выведем для этих моделей формулы, по которым можно вычислить средние влагозапасы, а затем, задаваясь различными значениями исходных параметров, проведем с помощью ЭВМ численный эксперимент и покажем, какова разница при расчете средней величины влагозапасов по различным формулам.

При построении моделей сделаем следующие предположения:

а) выпавшие осадки испаряются с интенсивностью испаряемости  $E_0$  (следовательно, количество суток  $m$ , за время которых выпавшие осадки испаряются, равно  $m = \frac{H}{E_0}$ );

б) до выпадения осадков и после их испарения уменьшение влагозапасов происходит с одинаковой интенсивностью  $E$ , меньшей, чем испаряемость.

В качестве первой модели возьмем модель изменения влагозапасов почвы при выпадении одного дождя, причем будем считать, что выпавшие осадки полностью испаряются внутри интервала между сроками измерения влагозапасов ( $i+m \leq I$ ). Для вывода формулы воспользуемся графическим построением, приведенным на рис. 14. Средние влагозапасы за период  $I$  определяются как средневзвешенная величина за интервалы  $i$ ,  $m$ ,  $I-m-i$ , т. е.

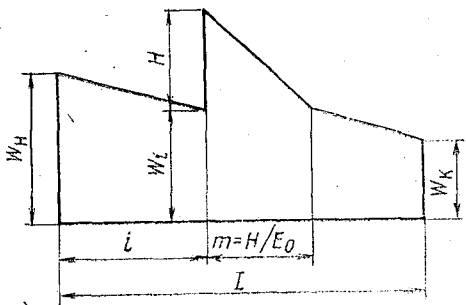


Рис. 14. Схема хода влагозапасов почвы в зависимости от времени выпадения осадков, их величины и испаряемости при выпадении одного дождя

$$W_{cp} = \frac{1}{I} [W_{cp, i} i + W_{cp, m} m + W_{cp, I-m-i} (I-m-i)]. \quad (44)$$

Выразив средние влагозапасы за интервалы  $i$ ,  $m$ ,  $I-m-i$  через исходные параметры и выполнив несложные преобразования, получим

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k}{2} + \frac{m}{2I} \left[ H + \frac{(W_k - W_n)(m + 2i - I)}{I - m} \right]. \quad (45)$$

В качестве другой модели пусть будет модель изменения влагозапасов почвы в случае выпадения двух дождей за расчетный период, причем вторые осадки выпадают после частичного испарения первых, и полное испарение осадков завершается за пределами интервала  $I$  ( $i_1 + m_1 \geq I$ ,  $i_2 + m_2 \geq I$ ) (рис. 15). Здесь расчетная формула для определения средних влагозапасов имеет вид

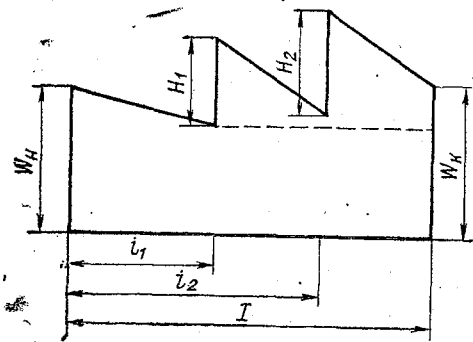


Рис. 15. Схема хода влагозапасов почвы в зависимости от времени выпадения осадков, их величины и испаряемости при выпадении двух дождей

$$W_{cp} = \frac{W_n + W_k}{2} + \frac{1}{2I} \times \left[ (W_k - W_n)(I - i_1) + E_{0,1} i_2 (i_2 - i_1) + E_{0,2} (I - i_2)(i_2 - i_1 + I) + H_2 (i_1 - 2i_2) - H_1 i_1 \right]. \quad (46)$$

Аналогично рассматривались и другие модели изменения влагозапасов почвы.

В формулах (45)–(46) первое слагаемое есть не что иное, как формула (38). Остальные слагаемые можно рассматривать в качестве

ве поправок к формуле (38) на учет осадков, выпавших за период между измерениями влагозапасов. Абсолютная величина поправки зависит от разности между начальными и конечными влагозапасами. Поэтому для результатов проверки расчета средних влагозапасов по различным формулам необходимо задавать следующие исходные параметры: разность влагозапасов, срок выпадения осадков и их величину, а также испаряемость. С целью проведения численного эксперимента этим параметрам присваивались следующие значения:

— разность между конечными и начальными влагозапасами при выпадении одного дождя принималась  $-20, -10, 0, 10$  мм, а при выпадении двух дождей  $-20, 0, 30$  мм;

— продолжительность расчетного периода — 10 сут;

— осадки, выпавшие за один дождь, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мм;

— количество суток, прошедших от начала периода до времени выпадения первых осадков при одном дожде, 1, 3, 5, 7, 9, а при двух дождях 1, 3, 5, 7;

— количество суток, прошедших от начала периода до времени выпадения вторых осадков, 3, 5, 7, 9;

— испаряемость 3, 6, 9 мм/сут.

Программа расчета на ЭВМ была составлена таким образом, что из множества различных сочетаний исходных параметров машина отбирала и просчитывала только те сочетания, которые не противоречат условиям задачи и вероятны в естественных условиях (например, срок выпадения вторых осадков не может быть меньше срока выпадения первых, увеличение влагозапасов к концу расчетного периода не может быть больше суммы выпавших осадков и т. п.). По результатам анализа групп исходных данных программой предусмотрен выбор одной из формул (45), (46) и др., приемлемой для этих условий, и расчет поправки к формуле (38). Для соответствующих условий производился и расчет поправки по формуле (40). Результаты расчетов показали следующее:

1) абсолютные величины поправок, вычисленные по формулам типа (45) и (46) и по формуле (40), в большинстве случаев или полностью совпадают, или оказываются весьма близкими;

2) наибольшего значения (16—18 мм) поправки достигают при выпадении осадков в начале или конце расчетного периода;

3) десяти миллиметров и более величина поправки достигает при единичном дожде, превышающем 20 мм.

На основании изложенного можно сделать некоторые выводы. Формулы вида (45)—(46) хотя и учитывают целый ряд факторов (осадки, испарение и влагозапасы), но являются более громоздкими, неудобными для применения в массовых практических расчетах и к тому же не дают существенных преимуществ в точности определения средних влагозапасов по сравнению с формулой (40).

Попытка еще больше детализировать указанные факторы приводит к тому, что формулы становятся еще сложнее.

Выражение (40), несмотря на присутствие ему ограничения, все же позволяет более точно по сравнению с формулой (38) вычислить средние влагозапасы за дождливый период. В диапазоне влагозапасов от 80 до 250 мм в метровом слое почвы применение формулы (38) может внести в вычисление средних влагозапасов ошибку от 5 до 15% (для указанных выше условий выпадения осадков), причем одинаковое количество осадков при больших влагозапасах дает, естественно, меньшую относительную ошибку. Вследствие этого для зоны избыточного увлажнения, где влагозапасы велики, при производстве расчетов целесообразно применять формулу (40) в тех случаях, когда сумма осадков за декаду превышает 20 мм. В зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения формула (40) позволит повысить точность расчета начиная с осадков, превышающих 10 мм. Для удобства расчетов средних влагозапасов по формуле (40) составлена табл. 2 поправок к выражению (38) в случае выпадения единичного дождя за рассматриваемый период; при выпадении нескольких дождей поправки суммируются.

Таблица 2

Поправки к средним влагозапасам (мм), учитывающие время выпадения осадков и их величину

H мм	i сут.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1
5	2	2	1	0	0	0	-1	-2	-2	-2
10	4	3	2	1	0	1	-2	-3	-4	-5
15	6	4	3	1	0	1	-3	-4	-6	-7
20	8	6	4	2	0	2	-4	-6	-8	-10
25	10	8	5	2	0	2	-5	-8	-10	-12
30	12	9	5	3	0	3	-6	-9	-12	-15

Все изложенное выше полностью относится и к случаям, когда на поле вместо естественных осадков поступают оросительные воды, т. е. полученные выводы распространяются не только на богарные, но и на орошаемые территории.

### 2.2.3. Учет связи вертикального распределения влагозапасов почвы и корневой системы с водопотреблением сельскохозяйственных культур

При построении биологических кривых водопотребления  $\bar{E}(W, \Phi)$  (рис. 6 в работе [2]) использовались данные о средних влагозапасах метрового слоя почвы  $W_{\text{ср}}$ . Такая характеристика не

учитывает однако вертикального распределения влагозапасов по профилю почвы. Одна и та же величина  $W_{\text{ср}}$  может быть получена при влагозапасах, сосредоточенных преимущественно в верхнем слое почвы (например, после дождя или полива) или в нижнем (в бездождный период). Так как корневая система растений распределяется неравномерно (сосредоточена преимущественно в верхних слоях почвы), то и доступность влагозапасов, расположенных в верхней и нижней части метрового слоя почвы, будет различной.

Для практического учета этого обстоятельства, кроме вертикального распределения влагозапасов почвы, нужно знать еще и вертикальное распределение массы всасывающей (активной) корневой системы растений  $m$ . Такие данные могут быть получены расчетным путем. Так, в п. 2.2.4 приводится описание эмпирической модели корневой системы озимой пшеницы, с помощью которой можно рассчитать послойное распределение массы  $m$  (в долях от общей массы корней) корневой системы культуры в разные фазы ее развития. Эта масса оказалась зависимой от глубины, фазы развития растений и в некоторой мере — от величины и распределения влагозапасов почвы по вертикали

$$m = f(z, W, \Phi). \quad (47)$$

Тогда средневзвешенные влагозапасы почвы, определяющие собою интенсивность транспирации растений  $W_{\text{т}}$ , будут равны

$$\bar{W}_{\text{т}} = \int_0^z m(z, W, \Phi) W(z) dz \quad (48)$$

или при послойном рассмотрении

$$\bar{W}_{\text{т}} = \sum_i m_i(z_i, W_i, \Phi) W_i(z_i) \Delta z_i. \quad (49)$$

Аналитическое выражение, учитывающее зависимость испарения с почвы, лишенной растительности, или с почвы, затененной растительностью, от вертикального распределения влагозапасов почвы, имеет вид

$$\bar{W}_{\text{п}} = \int_0^z a^{-bz} W(z) dz, \quad (50)$$

или при послойном рассмотрении

$$\bar{W}_{\text{п}} = \sum a^{-bz} W_i(z_i) \Delta z_i. \quad (51)$$

Здесь  $b$  — размерный коэффициент (1/см),  $a$  — эмпирический коэффициент, значение которого зависит от механического состава



и степени оструктуренности почв. Для супесей и хорошо оструктуренной почвы  $a=1,05$ , для почв обычной структуры и суглинков  $a=1,10$ , а для распыленных почв  $a=1,13$ .

При расчете суммарного водопотребления  $E$  необходимо учитывать долю транспирации  $E_t$  и испарения с почвы  $E_n$  (непродуктивное испарение):

$$\frac{E_n}{E} = f(T, \Phi), \frac{E_t}{E} = 1 - f(T, \Phi). \quad (52)$$

Поэтому средневзвешенные влагозапасы почвы при расчете водопотребления сельскохозяйственных культур могут быть определены из соотношения

$$\bar{W} = \frac{1}{E} (E_n \bar{W}_n + E_t \bar{W}_t) \quad (53)$$

или, подставляя в (53) из (48, 49) и (50, 51) значения  $W_n$  и  $W_t$ , получим

$$\bar{W} = \frac{1}{E} \left[ E_n \int_0^z a^{-bz} W(z) dz + E_t \int_0^z m(z, W, \Phi) W(z) dz \right] \quad (54)$$

При послойном рассмотрении величина  $W$  определяется как

$$\bar{W} = \frac{1}{E} [E_n \Sigma a^{-bz_i} W_i(z_i) \Delta z_i + E_t \Sigma m_i(z_i, W_i, \Phi) W_i(z_i) \Delta z_i]. \quad (55)$$

Использование средневзвешенных влагозапасов вместо средних их значений для метрового слоя почвы, с одной стороны, уменьшает разброс экспериментальных точек при построении зависимостей водопотребления по фазам развития от влагозапасов почвы (а вместе с тем и биологических кривых водопотребления), а с другой, — уточняет расчет водопотребления при конкретных погодных условиях и влагозапасах почвы.

#### 2.2.4. Эмпирическая модель корневой системы (на примере озимой пшеницы)

Знание закономерностей формирования корневой системы и умение определять ее параметры на любой стадии развития позволяют точнее учитывать особенности возделывания культур при выборе для них оптимальной агротехники, оценивать в разные фазы развития мощность слоя активного влагообмена почвы — важной характеристики при назначении поливных норм. Кроме того, это значение позволяет учитывать особенности корневой системы при расчете водопотребления культур с учетом вертикального распределения влагозапасов почвы (п. 2.2.3).

Зависимость максимальной или конечной глубины корневой системы  $L$  озимой пшеницы (в основном Мироновская 808) определяется прежде всего термическим режимом воздуха  $T$  и почвы  $T_n$ , их влажностью  $e$  и  $W$ , а также объемной массой почвы  $Q$ .

$$L = f_1(T, e, T_n, W, Q). \quad (56)$$

Термический режим почвы, как известно, тесно связан с температурой и влажностью воздуха и влагозапасами почвы. Поэтому

$$L = f_2(T, e, W, Q). \quad (57)$$

Влияние на корневую систему распределения влагозапасов почвы по глубине проще всего учесть через средние влагозапасы метрового слоя почвы  $W_{cp}$  и через отношение влагозапасов верхнего полуметрового слоя к нижнему  $W_B/W_H$ . Значения всех параметров берутся средними за теплый (осенне-весенне-летний) период вегетации озимой пшеницы. Тогда

$$L = f_3(T, e, W_{cp}, \frac{W_B}{W_H}, Q). \quad (58)$$

Основой статистического анализа, как и ранее, является рассмотренный выше остаточный метод с использованием графических регрессий. В соответствии с этим методом предусматривается последовательное исключение влияния на рост и развитие корневой системы определяющих факторов. Установлено, что более точные связи получаются при использовании не отдельных, а комплексных (попарных) значений определяющих факторов. В нашем случае комплексными параметрами могут быть температура и влажность воздуха, а также средние влагозапасы и их вертикальное распределение (характеризуемое членом  $W_B/W_H$ ). Тогда уравнение (58) может быть представлено как

$$L = L_{T, e}(T, e) + \Delta L_{W, \frac{W_B}{W_H}} \left( W, \frac{W_B}{W_H} \right) + \Delta L_Q(Q). \quad (59)$$

В соответствии с этим методом связь, выражаемая первым членом уравнения (59), представляется в виде изолиний, приведенных на рис. 16 (кривые 1). Средняя глубина корневой системы озимой пшеницы  $L_{cp}$  в используемой статистической выборке составляет 1,56 м. На графике нанесена относительная глубина корневой системы, определяемая из соотношения  $l = L/L_{cp}$ .

Точность приведенных графических построений характеризуется коэффициентом корреляции  $r = 0,66 \pm 0,11$  между измеренными  $l_{изм}$  и снятыми с графика (путем интерполяции между изолиниями) величинами  $l_{T, e}^r$  при  $\sigma_1 = 0,19$ ; кривая распределения разностей  $l_{изм}$  и  $l_{T, e}^r$  симметрична.

Используемый при анализе остаточный метод предусматривает определение разности  $\Delta l$  измеренных  $l_{изм}$  и рассчитанных  $l_{T, e}^r$  (с помощью изолиний, приведенных на рис. 16) величин

$$\Delta l_{T, e}^r = l_{изм} - l_{T, e}^r \quad (60)$$

Эта разность наносилась на график с осями  $W_{ср}$  и  $W_B/W_H$  (рис. 16, кривые 2).

Теснота связи между  $\Delta l_{W, W_B/W_H}$  и  $\Delta l_{T, e}^r = l_{изм} - l_{T, e}^r$ , характеризуется величиной коэффициента корреляции  $r = 0,42 \pm 0,072$ , а  $l_{T, e}^r + \Delta l_{W, W_B/W_H}^r$  с  $l_{изм}$  — величиной  $r = 0,74 \pm 0,009$ ,  $\sigma_2 = 0,14$ .

Величина  $\Delta l_Q$  определялась из равенства

$$\Delta l_Q = l_{изм} - (l_{T, e}^r + \Delta l_{W, W_B/W_H}^r) = \Delta l_{T, e}^r - \Delta l_{W, W_B/W_H}^r \quad (61)$$

и наносилась на график (рис. 17, кривые 1 и 2) в зависимости от объемной массы почвы и ее кислотности pH. Из графика рис. 17

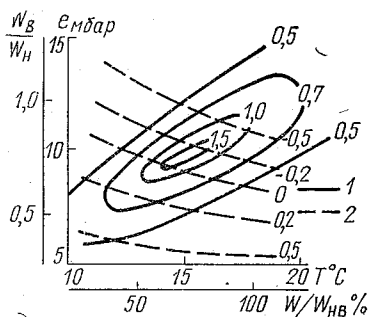


Рис. 16. Зависимость глубины проникновения корневой системы озимой пшеницы от температуры и влажности воздуха за теплый период вегетации (1), от средних влагозапасов метрового слоя почвы и их распределения по глубине (2)

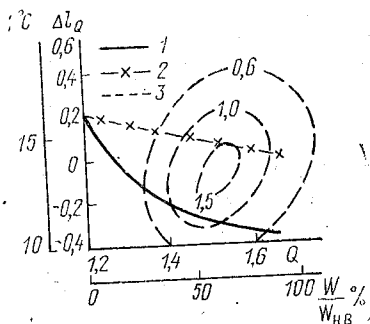


Рис. 17. Зависимость глубины проникновения корневой системы озимой пшеницы от объемной массы кислых (1) и щелочных (2) почв и зависимость общей массы корневой системы от средних значений температуры воздуха и влагозапасов почвы за теплый период вегетации (3)

следует, что кислые (лесные и дерново-подзолистые) почвы не стимулируют глубокого развития корневой системы из-за недостаточного количества влаги и сосредоточения гумуса и тепла в самом верхнем горизонте почвы. Наиболее благоприятствуют глубокому

развитию корневой системы слабо- и среднещелочные почвы: мощные, обыкновенные и южные черноземы.

После учета влияния на глубину корневой системы озимой пшеницы погоды ( $T$ ,  $e$ ), влагозапасов ( $W_{\text{ср}}$ ,  $W_{\text{в}}/W_{\text{н}}$ ) и плодородия почвы ( $Q$ ,  $pH$ ) теснота связи  $l_{\text{изм}}$  с  $l_{\text{рас}}$  повысилась до  $r=0,81 \pm 0,09$ ;  $\sigma_3=0,11$ . Для многих вопросов практики такую точность расчета глубины корневой системы можно считать достаточной.

Важной характеристикой корневой системы является скорость ее нарастания в процессе онтогенеза. Для исследования этого вопроса строился график роста относительной глубины корневой системы ( $L_i/L$ , где  $L_i$  — средняя глубина корневой системы в  $i$ -й межфазный период) по межфазным периодам  $\Phi$  (рис. 18, кривые 1). На этом рисунке

$$\zeta_i = \Delta m_i n_i / n, \quad (62)$$

где  $\zeta_i$  — относительная масса корней в  $i$ -ом слое;  $n$  — общее число слоев.

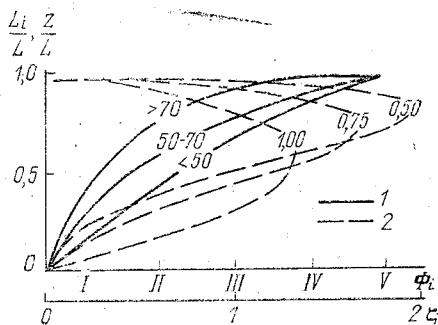


Рис. 18. Зависимость интенсивности роста корневой системы  $\zeta$  (в глубину) от средних влагозапасов почвы по межфазным периодам (I) и связь между вертикальным распределением массы корневой системы и влагозапасами почвы (2).

Межфазные периоды: I — посев — осеннее прекращение вегетации; II — возобновление вегетации — выход в трубку; III — выход в трубку — колошение; IV — колошение — восковая спелость; V — после уборки

Теснота связи  $(L_i/L)_{\text{рас}}$  и  $(L_i/L)_{\text{изм}}$  характеризуется  $r=0,64 \pm 0,12$ . Если же при этом используются не измеренные, а рассчитанные по уравнению (59) значения  $L$ , то теснота той же связи снижается незначительно ( $r=0,61 \pm 0,12$ ). Приведенные на рис. 18 кривые 1 позволяют рассчитывать глубину проникновения корневой системы в разные фазы развития озимой пшеницы по средним значениям  $T$ ,  $e$ ,  $W_{\text{ср}}$ ,  $W_{\text{в}}/W_{\text{н}}$  и  $Q$  за вегетационный период.

До сих пор речь шла о глубине корневой системы. Для практики важно знать и ее массу или вес корней  $M$ . С этой целью исследовалось распределение  $m(z)$  развитой корневой системы по глубине. Изменения  $m_i = (M_i/M)$  с глубиной (рис. 18, кривые 2) показывают, что слой, в котором величина  $m_i(z)$  максимальна, расположен в верхних 40% глубины слоя  $L$ . При относительно малых

влагозапасах нижней половины метрового слоя почвы ( $W_b/W_n > 0,75$ , что характерно для орошаемых полей) имеет место более однородное распределение по глубине корневой системы, чем при сосредоточении влаги в нижних слоях, при котором узловые корни глубоко проникают в почву.

Важной задачей проводимого исследования корневой системы озимой пшеницы является уточнение методики расчета ее водопотребления (п. 2.2.3). Для этого в расчёт должна приниматься лишь та масса корней, которая расположена в данном конкретном слое и является сосущей в рассматриваемом слое. При этом из общей массы корней  $i$ -ого слоя  $m_i$  вычитается вес, имевший место в более низком слое  $m_{i-1}$ . Таким образом достигается возможность учета массы корневой системы  $\Delta m_i$  и ее сосущей силы, активно действующей именно в рассматриваемом  $i$ -ом слое, так как корни нижележащих слоев, увеличивая массу корневой системы данного  $i$ -го слоя, не используют его влагу: из нижележащих слоев к наземной части растений вода проходит рассматриваемый слой транзитом.

Для перехода от величины  $m_i$  к величине прироста (по глубине) корневой системы в  $i$ -ом слое  $\Delta m_i$ , в том же слое достаточно от величины  $m_i$  отнять массу корневой системы нижележащего слоя, т. е.

$$\Delta m_i = m_i - m_{i-1}. \quad (63)$$

При  $(z/L) \rightarrow 0$ ,  $m \rightarrow M$ , где  $M$  — общая масса корневой системы.

Знание максимальной глубины корневой системы и ее распределения по вертикали еще не решает вопрос об общей массе корневой системы или ее весе  $M$ . Соответствующий анализ (см. рис. 17) показал, что максимальное развитие массы (а не глубины) корневой системы имеет место при тех же условиях, что и для максимальной урожайности ( $W = 60 \div 70\%$ ,  $T = 12 \div 14^\circ\text{C}$ ). Как и ранее, масса корневой системы на рис. 17 (кривые 2) представлена относительными величинами

$$m = M/M_{\text{ср}}, \quad (64)$$

где  $M_{\text{ср}} = 57$  г — средняя масса корневой системы по данным принятой для анализа выборки. Теснота связи между  $m$  и  $m_{\text{рас}}^r$  (определенного с помощью рис. 17) характеризуется  $r = 0,77 \pm 0,09$ ,  $\sigma = 0,12$ .

Зная величину  $m$ , а следовательно, и  $M$ , с помощью изолиний, приведенных на рис. 18 (кривые 2), легко может быть определена конечная масса корневой системы  $m$  в любом почвенном слое, а с помощью рис. 18 (кривые 1) — и за любой межфазный период  $\Phi_i$ .

## 3. ОСНОВЫ ОСУШЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ

### 3.1. Общие сведения

Осушение — это устранение избытка воды из почвы. Для его осуществления устраивается осушительная система, т. е. система гидротехнических и вспомогательных сооружений для осушения земель. Основу осушительных систем составляет дренаж, представляющий собой устройства (см. п. 3.1.2) для сбора и отвода профильтровавшихся и подземных вод.

Для зоны избыточного увлажнения осушение является одним из основных средств интенсификации сельскохозяйственного производства, обеспечивающее наиболее рациональное использование земли, средств механизации и химизации сельского хозяйства. До тех пор, пока из почвы не будет своевременно удален избыток воды, все остальные средства обычно экономически неэффективны.

#### 3.1.1. История развития осушения

С сельскохозяйственными целями человек начал применять осушение за 3 тыс. лет до н. э. в Раннем Египте. За 2 тыс. лет до н. э. в Месопотамии для осушения пашни использовали гончарный дренаж (дырчатые трубы), а в древнем Риме для осушения виноградников и пашни — каменный или римский дренаж. Начиная с 9—10 вв., осушением была отвоевана у моря территория современных Нидерландов. В 16 веке в Англии были построены первые дренажи из керамических труб, а с конца 18 века в Европе стали довольно широко применять осушение открытыми каналами. После изобретения в 1843 г. англичанином Дж. Ридом глинопресса началось массовое изготовление дренажных труб на заводах, и с этого времени закрытый дренаж получил распространение в европейских странах, а с конца 19 века — в США, вытесняя постепенно открытые системы.

Осушение на территории России было известно с конца 14 века. Однако только во второй половине 19 века осушение начало развиваться в Полесье, северо-западных губерниях и центральном промышленном районе, а с 1890 г. — в Западной Сибири.

Широкое развитие осушение в нашей стране получило после Октябрьской революции. За годы Советской власти площадь осушенных земель в СССР увеличилась более чем в 3 раза и составляет свыше 10 млн. га. Однако в этом направлении предстоят еще очень большие работы. У нас нуждаются в осушении около 15 млн. га пашни, 19 млн. га сенокосов, более 20 млн. га пастбищ, 1,5 млн. га залежей и 120 млн. га низинных и переходных болот, всего почти 200 млн. га. В эту площадь не входят тундра, районы вечной мерзлоты и некоторые другие.

Интенсивные осушительные работы в зарубежных странах проводятся в основном в избыточно увлажненных районах Северной Америки и Европы. Общий фонд переувлажненных земель в США 110 млн. га, в том числе болот около 32 млн. га; осушено свыше 40 млн. га. В некоторых странах Северной Европы земледелие почти целиком или в значительной степени ведется на осушенных землях. В Нидерландах осушение проведено на 44% сельскохозяйственной площади. В Швеции осушен 1 млн. га (27% сельскохозяйственной площади), в Финляндии — 2,9 млн. га (35%), в ГДР осушено 20% сельскохозяйственной площади, в Польше — 29%. В указанных и других странах осушительные работы продолжают.

### 3.1.2. Технические средства осушения

Как указывалось выше, осушение сельскохозяйственных угодий осуществляется путем устройства на них осушительных систем. Современные осушительные системы представляют собой сложные гидротехнические объекты, в составе которых принято выделять: осушительную сеть, сооружения на сети, водоприемник. Осушительную сеть в свою очередь разделяют на регулирующую, ограждающую и проводящую сети.

Регулирующая сеть служит для своевременного удаления избытков воды весной и осенью из корнеобитаемой почвы, что способствует созданию здесь оптимального для сельскохозяйственных культур водного, газового и теплового режимов и условий для эффективной работы сельскохозяйственных машин и использования удобрений. Эта сеть состоит из расположенных по полю в определенном порядке осушителей, в качестве которых могут быть или открытые каналы, или закрытые с поверхности дрены. Открытые осушители (каналы) принимают в себя и отводят поверхностные воды, а также косвенно (благодаря испарению) воздействуют на режим грунтовых вод. Их устройство допустимо: на естественных сенокосах (без пастбы на них скота); при первоначальном осушении торфяных болот для сброса вековых запасов болотной воды; на пойменных землях, используемых как луговые угодья; в лесонасаждениях. Дрены, хотя и более дорогие по сравнению с открытыми осушителями, имеют неоспоримые преимущества в отношении технологии сельскохозяйственного производства (не занимают территории поля, не мешают движению техники и др.). Современные закрытые осушители представляют собой дренажные трубы (керамические, пластмассовые и т. п.), уложенные на некоторой глубине под поверхностью поля. Вода поступает в эти трубы (диаметром 50—100 мм) через зазоры в стыках, которые, когда это необходимо, защищают мхом, щебнем, стеклохолстом и другими фильтрующими материалами.

Ограждающая сеть защищает осушаемую площадь от притока на нее избыточных вод с окружающей территории водосбора. Конструктивно эта сеть также может быть выполнена в виде каналов или дрен. При этом каналы называют нагорными, если они предназначены для перехвата склонового стока. Если же канал или дрена предназначены для защиты осушаемой площади от поступления грунтового стока, то их называют ловчими.

Проводящая сеть предназначена для транспортировки всей собираемой с осушаемой территории воды в ближайший водоприемник. Эта сеть состоит из открытых или закрытых коллекторов (в которые поступает вода из осушительной сети) и открытых магистральных каналов различных порядков (получающих воду из коллекторов и ограждающей сети), которые последовательно сливаясь подают воду в главный магистральный канал и далее в водоприемник.

Водоприемником осушительной системы обычно является река, реже озеро или водохранилище. Водоприемник считается удовлетворительным, если не оказывает подпора осушительной сети. В противном случае его регулируют (увеличивают пропускную способность) или переходят на механическое осушение (с перегонкой стока насосными станциями).

Различные гидротехнические сооружения на осушительной сети (шлюзы — регуляторы, перепады, проезды, насосные станции и др.) необходимы для нормального функционирования всей осушительной системы. Более подробно конструкция и назначение этих и других сооружений, используемых в мелиорации, изучаются студентами в первом разделе курса «Основы гидротехники и гидрометрические сооружения».

## **3.2. Принципы определения параметров осушительных мероприятий**

### **3.2.1. Взаимосвязь водного режима осушаемых почв с методами осушения**

Водный режим почв в естественных условиях в значительной степени зависит от типа водного питания, который устанавливается гидрологическими, гидрогеологическими и почвенно-мелиоративными изысканиями. В практике осушения выделяют: атмосферный тип водного питания — в приходной части положительного водного баланса абсолютное значение принадлежит атмосферным осадкам (свойственен плоским ландшафтам с почвами тяжелого и среднего механического состава); грунтовый тип — в приходной части водного баланса преобладают грунтовые воды (характерен для почв среднего и легкого механического состава, низинных болот, обычен для ландшафтов с пологими склонами и низинами); грунтово-напорный — с преобладанием в приходной части водного



баланса напорных грунтовых вод; намывной речной (аллювиальный) — характеризуется продолжительным затоплением паводковыми водами пойм и плавней (типичен для заболоченных пойм рек-водоприемников); намывной склоновый (делювиальный) — формируется за счет ливневых осадков на склонах с тяжелыми почвами (характерен для предгорных районов влажных субтропиков, моренных ландшафтов).

Водный режим осушенных земель характеризуется влажностью почвы в зоне распространения корней сельскохозяйственных культур и продолжительностью затопления почвы поверхностными водами. Для аэрации активного слоя почвы содержание воздуха в нем при выращивании трав должно быть 15—20% от скважности почвы, для зерновых хлебов 20—30% и для корнеплодов 35—40%.

Для осушаемых земель грунтового и грунтово-напорного типов водного питания влажность почвы регулируется понижением уровня грунтовых вод. Расстояние от поверхности почвы до грунтовых вод, при котором обеспечивается влажность корнеобитаемого слоя почвы, необходимая для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур, называется нормой осушения. Она зависит от свойств грунтов и климатических условий района и, в связи с углублением корневой системы по мере роста растений, изменяется в течение вегетационного периода. Оптимальную норму осушения устанавливают опытным путем. Обычно она колеблется в пределах 0,4—0,7 м для трав; 0,7—0,9 м для зерновых и 0,8—1,2 м для кормовых и технических культур.

Затопление земель весной обычно благоприятно влияет на плодородие почвы, так как вешние воды приносят с собой некоторое количество питательных веществ и ускоряют оттаивание почвы. Однако длительное затопление задерживает начало сельскохозяйственных работ и снижает урожайность. Летнее затопление водами, притекающими со стороны, не допускается при любом с.-х. использовании земель, так как приводит к гибели посевов или существенному снижению урожая. Атмосферные осадки, выпадающие непосредственно на осушаемую площадь в летне-осенний период, должны отводиться в короткие сроки — с посевов зерновых и овощных культур за 0,2—0,25, с пастбищ за 0,75—0,8 и с сенокосов за 1,0—1,5 суток.

В зависимости от типа водного питания осушаемой территории и требуемого водного режима осушенных земель применяют различные методы и технику осушения. При атмосферном типе водного питания — ускорение поверхностного стока с помощью открытых осушителей и дополнительных мероприятий по организации отвода поверхностного стока. При грунтовом типе — ускорение стока грунтовых вод с понижением их уровня до нормы осушения закрытым дренажем или редкими глубокими осушителями; при наличии притока грунтовых вод — дополнительное ограждение

территории ловчими каналами (со стороны водосбора) или береговым дренажом (со стороны реки, водохранилища). При грунтово-напорном питании — снижение пьезометрического уровня грунтовых вод с помощью глубоких дрен или вертикального дренажа (скважин). При затоплении паводковыми водами — ограждение осушаемых земель со стороны склонов нагорными каналами и со стороны реки, озера, моря — ограждающими валами (дамбами); постройка на защищенной территории закрытой или открытой осушительной сети, насосных станций для механического удаления воды.

### 3.2.2. Характеристики плодородия осушенных почв

Можно считать, что условия погоды влияют на урожайность на осушенных (т. е. органогенных) почвах так же, как и на минеральных. Основные различия в условиях формирования урожайности состоят в отличии плодородия осушенных земель и торфяников, с одной стороны, и минеральных почв, — с другой. Для минеральных почв в качестве исходных характеристик плодородия были использованы влагозапасы и объемная масса почвы с учетом ее кислотности. Влагозапасы для осушенных почв играют ту же роль, что и для минеральных. Осушенные почвы и торфяники имеют кислую реакцию. Это обстоятельство делает исходную информацию для этих почв более однородной, чем для минеральных почв, где кислотность меняется в более широких пределах. Таким образом, наиболее сложным вопросом анализа плодородия осушенных почв является оценка правомерности использования их объемной массы в качестве одной из основных характеристик плодородия.

Характер изменений объемной массы в зависимости от типов почв показан на рис. 19, из которого следует, что характеристики торфяников и осушенных почв лежат в одном ряду с закономерно меняющимися параметрами основных типов почв на территории СССР.

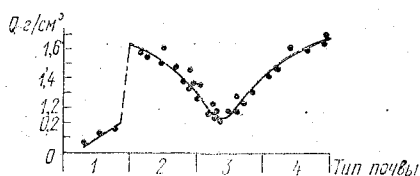


Рис. 19. Связь объемной массы с основными типами почв СССР: 1 — торфяники; 2 — подзолы; 3 — черноземы; 4 — сероземы

Органогенные почвы типичны для зоны избыточного увлажнения. Переувлажнение затрудняет доступ кислорода в почву, вследствие чего ослабляется процесс разложения органических остатков, накопление которых ведет к постепенному образованию торфяников.

Кривые на рис. 20, характеризующие заболоченные почвы и торфяники, являются закономерным продолжением кривых на рис. 9, на котором показана связь объемной массы минеральных почв с основными химическими и биохимическими элементами (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Q). Из рис. 9 следует, что с ростом кислотности почвы (при движении от средней части графика влево, т. е. от черноземов — к подзолам) уменьшается содержание в ней всех основных факторов плодородия — азота, фосфора и гумуса, — что ведет к снижению урожайности. Эта закономерность прослеживается и для органогенных почв (рис. 20).

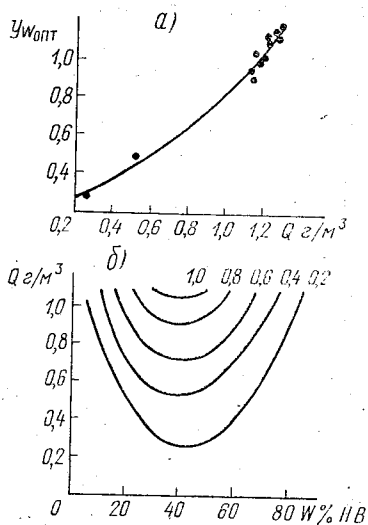


Рис. 20. Связь коэффициента урожайности  $U_{W_{opt}}$  кислых почв с их объемной массой (а), зависимость  $U_{W_{opt}}$  от плодородия почвы (б), характеризующего ее продуктивными влагозапасами  $W\% \text{ НВ}$  и объемной массой  $Q \text{ г/см}^3$

плодородие кислых почв снижается, как уже говорилось, вследствие постепенного уменьшения степени их минерализации, обусловленного увеличением количества неразложившихся органических компонентов в почве. Если проследить изменение плодородия органогенной почвы в зависимости от ее объемной массы и средних влагозапасов за вегетационный период (рис. 20, б), то можно заметить ту же тенденцию снижения плодородия по мере уменьшения  $Q$  ниже оптимального, что и для минеральных почв. Данные рис. 9 и 20, б характеризуют постепенный переход от минеральных почв — через староосушенные (заболоченные) — к новоосушенным (болотным) почвам. Экспериментальные данные вполне подтверждают справедливость нижней части графика рис. 9 для минеральных почв, включая и торфяники (рис. 20).

На рис. 9 представлена кривая, показывающая связь коэффициента плодородия разных типов кислых почв при оптимальных влагозапасах  $W_{opt}$  с различными параметрами плодородия. Эта связь построена остаточным методом. Величина  $U_{W_{opt}}$ ,  $Q$  характеризует относительную урожайность при исключенном влиянии на нее погодных условий. Продолжение этой связи для осушенных торфяников приведено на рис. 20, а. В пределах от торфяников до черноземов происходит рост плодородия, оптимум которого приходится на мощные черноземы ( $Q = 1,2 \div 1,3 \text{ г/см}^3$ ). При уменьшении  $Q$  по сравнению с оптимумом

Коэффициент корреляции между снятыми с изолиний и измеренными параметрами плодородия органогенных почв  $y_{w, Q}$  составляет  $r=0,69$ ,  $\sigma=\pm 0,09$ . Таким образом, объемная масса не только минеральных, но и органических почв, наряду с влагозапасами, является основной характеристикой их плодородия.

### 3.2.3. Связь плодородия с периодом после осушения

Количественные характеристики различных свойств торфяно-болотных почв изменяются в зависимости от типа торфяника и его физико-химических свойств. На основе данных, описывающих связь объемной массы торфа с его влажностью и степенью разложения, установлено, что при увеличении степени разложения от 10 до 60% объемная масса изменяется от 0,130 до 0,394 г/см<sup>3</sup> при влажности 10% и от 0,705 до 1,047 при влажности 90%.

Изменения почвенных характеристик торфяников после осушения могут быть объяснены следующим образом. По мере понижения уровня грунтовых вод вследствие осушения улучшается аэрация торфяников. Почвенно-биологические процессы при этом активизируются, усиливается окисление органического вещества торфа. В результате часть органического вещества превращается в газообразные соединения и улетучивается, а оставшиеся зольные элементы частью расходуются на питание растений, частью выносятся через дренажную сеть вместе с грунтовыми водами.

В нашем распоряжении имелись данные, полученные на опытных и производственных участках Белорусского и Украинского Полесья (Полесская опытная болотная станция и Барышевская болотная станция). На Полесской опытной станции возраст осушенных торфяников 12 лет, на Барышевской 17. Кроме того, были использованы материалы наблюдений над объемной массой осушенных торфяников Эстонской ССР разного возраста осушения (до 60 лет) и данные Минской болотной станции (до 52 лет).

Изменчивость объемной массы осушенного торфяника в зависимости от возраста осушения  $\tau$  представлена на рис. 21. Возрастание объемной массы осушенных торфяников наиболее интенсивно идет в первые годы после осушения.

Основной причиной увеличения объемной массы метрового слоя торфяников после их осушения является уменьшение их мощности или «срабатывание». За объемную массу почвы принимают среднюю величину объемной массы метрового слоя. Если мощность пласта торфа менее 1 м, то по мере его срабатывания все более становится заметным влияние на его объемную массу подстилающей почвы. При этом  $Q$  может возрасти до 1,0 г/см<sup>3</sup> и более. Для исключения этого влияния при расчете средних значений  $Q$  были взяты значения объемной массы только торфяника (пахотного го-

ризонта). Это позволило проследить изменение объемной массы торфяника без учета подстилающих грунтов.

Для подтверждения количественных значений изменения  $Q$  с увеличением возраста осушения было проведено специальное натурное исследование. На территории осушенных торфяников Полесской опытной болотной станции и запovedника осуществлялась маршрутная съемка с определением объемной массы. Маршруты были составлены с учетом изменения возраста осушения торфяников. Пробы брались буром ударного действия, разработанным сотрудниками БелНИИГим специально для торфяных почв. Расстояние между точками определения  $Q$  составляло 500 и 100 м.

В табл. 3 представлены обработанные результаты полевых исследований. Эти данные достаточно четко характеризуют изменение объемной массы в зависимости от возраста осушения и влияния агротехнических мероприятий.

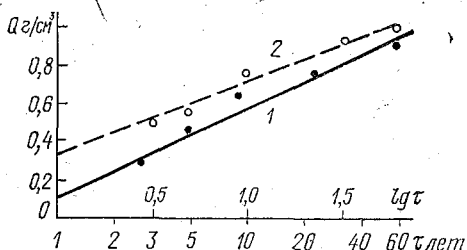


Рис. 21. Связь объемной массы торфа  $Q$  г/см<sup>3</sup> с возрастом осушения  $t$ :  
1 — низинные болота; 2 — верховые болота

Таблица 3

Средние значения объемной массы (г/см) в слое 0—30 см осушенных и неосушенных торфяников Полесской опытной болотной станции

Месяц	Маршрут I				Маршрут II			Маршрут III		Неосушен- ный тор- фяник
	число лет с момента осушения							2	1	
	10—11	7—8	4—5	2—3	10—11	7—8	4—5			
Июль	0,33	0,25	0,30	0,27	0,34	0,20	0,16	0,26	0,18	0,08
Август	0,34	0,21	0,17	0,19	0,44	0,23	0,17	0,40	0,24	0,11

На величину объемной массы также влияет характер увлажненности торфяников. Повсюду объемная масса осушенных торфяников в 2—4 раза превосходит объемную массу неосушенных. С увеличением числа лет, прошедших после осушения, объемная масса существенно возрастает.

Таким образом, проведенные исследования еще раз подтверждают справедливость закономерности роста объемной массы осушенных почв с возрастом осушения. Это обстоятельство позволяет использовать упомянутую зависимость (совместно с графиком рис. 20) для оценки урожайности осушенных земель.

#### 3.2.4. Расчеты влагообмена в почве

Вода в почве практически всегда находится в движении вплоть до сильного иссушения. Наиболее высокая скорость наблюдается при движении гравитационной влаги. При этом различают стадию впитывания влаги в почву и стадию фильтрации, когда происходит дальнейшее передвижение и перераспределение влаги, впитавшейся в почву. Часто эти процессы объединяют термином «инфильтрация».

Одна из разновидностей инфильтрации—капиллярный подъем, при котором поток идет снизу вверх. Опытные данные свидетельствуют о том, что скорость капиллярного поднятия такова, что во многих случаях расход воды на испарение почвы и транспирацию растений обеспечивается за счет грунтовых вод. Поэтому при нормировании режимов орошения необходимо иметь ясное представление как о процессе впитывания ирригационных и дождевых вод в почву, ведущем к накоплению в почве запаса влаги, так и о капиллярных явлениях, обеспечивающих подпитывание корнеобитаемого слоя почвы за счет грунтовых вод.

В настоящее время существует два основных подхода к изучению закономерностей передвижения влаги в почве. Исторически первым развивался воднобалансовый метод, направленный на выявление конкретных механизмов движения влаги в почве. Использование этого метода позволило получить большой объем экспериментальных данных о различных составляющих водного баланса и в конечном счете — получить сведения об интенсивности и размерах влагопереноса в почве, в зоне аэрации, в грунтовых водах.

В современных исследованиях большое значение имеет развитие термодинамического подхода, в основе которого лежит изучение сил и энергии взаимодействия между водой и твердой фазой почвы и растений. Для описания энергетического состояния сложной многокомпонентной системы, какой является почва, было введено понятие о термодинамическом потенциале почвенной влаги (иначе, свободная парциальная энергия). Полный термодинамический потенциал ( $\Phi$ ) — это работа, которая должна быть затрачена (в расчете на 1 г чистой воды) для того, чтобы обратимо и изотермически перенести в заданную точку почвы бесконечно малое количество воды из объема чистой воды, находящегося при атмосферном давлении и на условном высотном уровне сравнения,

Полный потенциал является суммой четырех частных потенциалов, имеющих отрицательные значения: адсорбционного, капиллярного, осмотического и гравитационного. Причиной движения влаги является разность потенциалов, движение происходит из участков с более высоким потенциалом в участки с более низким, при этом уровень свободной энергии системы почва — вода понижается. В обычной объемной воде потенциал влаги равен нулю, увеличиваясь по абсолютной величине по мере перехода к сухой почве и уменьшаясь по мере ее насыщения. Основным достоинством термодинамического метода является то, что в отличие от воднобалансового, этот метод позволяет исследовать физику процесса передвижения воды в почве.

Потенциалы влаги определяются эмпирически. Часто бывает достаточно измерить лишь величину полного потенциала влаги. Разработаны методы определения его составляющих, например криоскопические, гигроскопические, гидравлического равновесия и др.

Для описания процесса движения влаги в почве используется уравнение Дарси, которое было получено для потока влаги в почве, насыщенной влагой. Дарси (1856 г.) обнаружил существование прямой зависимости между установленным потоком и градиентом давления влаги. Для ненасыщенного потока в большинстве природных ситуаций также сохраняется пропорциональность между градиентом потенциала влаги (движущей силой потока) и скоростью движения влаги в почве

$$V = -K \frac{\Delta\Phi}{\Delta l}, \quad (65)$$

где  $V$  — поток влаги в почве;  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta l}$  — градиент потенциала влаги (гидравлический напор), равный отношению перепада давлений ( $\Delta\Phi$ ) в двух точках к длине вдоль линий тока между ними ( $\Delta l$ );  $K$  — коэффициент влагопроводности.

Решая уравнение (65) совместно с уравнением неразрывности

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad (66)$$

получаем общее уравнение потока влаги в почве

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \frac{\partial \Phi}{\partial l} \right], \quad (67)$$

где  $t$  — время;  $q$  — содержание влаги в долях объема почвы.

Полный потенциал ( $\Phi$ ) обычно расчленяют на составляющие:

$$\Phi = \psi + Z, \quad (68)$$

где  $\psi$  — капиллярно-сорбционный потенциал;  $Z$  — гравитационный потенциал (осмотический потенциал при исследовании движения влаги обычно не рассматривается).

Подставляя (68) в (67), записывая член  $K \frac{\partial \Psi}{\partial x} = K \frac{\partial \Psi}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial x}$  и введя величину  $D = K \frac{\partial \Psi}{\partial q}$ , получаем нелинейное уравнение диффузии влаги:

для горизонтального потока

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(q) \frac{\partial q}{\partial x} \right]; \quad (69)$$

для вертикального потока

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(q) \frac{\partial q}{\partial z} \right] + \frac{\partial K}{\partial z}. \quad (70)$$

Здесь  $D$  — коэффициент диффузивности почвенной влаги, зависящий от свойств почвы и влажности.  $K$  — коэффициент влагопроводности, чрезвычайно сильно меняющийся при изменении влажности или потенциала почвенной влаги.

Поскольку член  $\frac{\partial \Psi}{\partial q}$  изменяется по-разному при иссушении и увлажнении почвы, то решение уравнений (69) и (70) ограничивается описанием одного из этих процессов. Для решения необходимо знание функциональных зависимостей между влажностью ( $q$ ) и величиной капиллярно-сорбционного потенциала ( $\psi$ ) и между  $q$  и коэффициентом влагопроводности ( $K$ ).

Величину  $K(q)$  называют еще гидравлической проводимостью почвы, а зависимость  $\psi = f(q)$  — влажностной характеристикой.

В качестве примера приведем некоторые экспериментальные данные, которые дают представление о значениях коэффициента влагопроводности и давления почвенной влаги в зависимости от влажности почв, их типа и механического состава. Так, для чернозема обыкновенного среднесуглинистого при изменении влажности в слое 0—50 см ( $Q = 1,15$  г/см<sup>3</sup>) от 31 до 26% давление почвенной влаги ( $\psi$ ) увеличивается от 100 до 500 см вод. ст., коэффициент влагопроводности ( $K$ ) уменьшается при этом от 1,22 до 0,0445 см/с; для дерново-подзолистой супесчаной почвы при изменении влажности в слое 0—10 см ( $Q = 1,26$  г/см<sup>3</sup>) от 42 до 10% величина  $\psi$  возрастает от 100 до 1000 см вод. ст., а величина  $K$  уменьшается от 0,625 до 0,0113 см/с.

Уравнения (69) и (70) в принципе позволяют получить эпюры влажности в любой точке. Однако аналитическое их решение возможно лишь для очень простых случаев зависимостей  $\psi(q)$  и  $K(q)$ .



Чаще применяют численные методы решения, заменяя дифференциальное уравнение конечно-разностным. Но и в этом случае решение практических задач оказывается весьма громоздким и дорогостоящим, требующим больших затрат машинного времени. Поэтому до настоящего времени важное значение имеют эмпирические зависимости и приближенные аналитические выражения, позволяющие охарактеризовать процессы влагопереноса в почве.

Рассмотрим стадию впитывания почвенной влаги. Для характеристики скорости этого процесса А. Н. Костяковым впервые был введен коэффициент впитывания, изменяющийся в процессе впитывания. По данным И. И. Судницына средняя скорость впитывания светло-каштановой почвой изменяется от 1—2 мм/мин в начале опыта до 0,1—0,4 мм/мин через 5—6 часов. В экспериментальных исследованиях А. Р. Константинова, Е. П. Голицыной на черноземах обыкновенных интенсивность впитывания уменьшается от 5 мм/мин в начале опыта до 0,4 мм/мин через 2 часа и 0,05 мм/мин через 15 часов; темно-серые лесные почвы характеризуются скоростью впитывания 3—4 мм/мин в начале опыта, 0,02 мм/мин — через 2 часа и 0,01 мм/мин через 25 часов. Уменьшение скорости впитывания во времени объясняется тем, что по мере впитывания при возрастании мощности промоченной толщи уменьшается градиент давления влаги. Кроме того, при поступлении воды на поверхность почвы верхний слой сильно диспергируется и набухает, что создает высокое сопротивление движению воды. По А. Н. Костякову уменьшение коэффициента впитывания во времени можно представить уравнением

$$k_t = \frac{k_n}{t^\alpha}, \quad (71)$$

где  $k_t$  — коэффициент впитывания, равный количеству воды, впитывающейся за единицу времени через единицу поверхности почвы в некоторый момент времени  $t$ ;  $k_n$  — начальная величина коэффициента впитывания;  $\alpha$  — эмпирический коэффициент ( $\alpha < 1$ ).

Для большинства почв формула дает неплохую сходимость с наблюдаемыми данными.

Для описания собственно процесса инфильтрации, т. е. передвижения и перераспределения влаги в почве, также предложен ряд эмпирических зависимостей.

Гарднер и Уидстоу предложили уравнение

$$y = y_f + (y_0 - y_f) e^{-at}, \quad (72)$$

где  $y_0$  и  $y_f$  — начальное и конечное (установившееся) значение скорости инфильтрации  $y$ ;  $a$  — эмпирический коэффициент, зависящий от типа почв.

Для небольших величин  $t$  хорошее совпадение с экспериментальными данными получается по уравнению Костякова

$$i = Kt^\alpha, \quad (73)$$

где  $i$  — суммарная инфильтрация;  $K$  — коэффициент влагопроводности;  $\alpha$  — эмпирический коэффициент.

И. И. Судницын для конечных этапов впитывания в однородные по физическим свойствам грунты дает формулу движения влаги, выведенную на основе уравнения Дарси и предположения, что слой почвы, промоченный к моменту  $t$ , полностью насыщен влагой и коэффициент его влагопроводности ( $K$ ) близок к коэффициенту фильтрации ( $K_\phi$ ). При этом перепад давления между сухой подстилающей и промоченной толщами ( $\Delta P$ ) много меньше мощности промоченной толщи ( $h$ ):

$$h_t = \frac{2K_\phi}{\Delta W} t, \quad (74)$$

где  $h_t$  — глубина фронта промачивания;  $\Delta W$  — разность между наименьшей влагоемкостью и начальной влажностью почвы.

Приведенные уравнения в целом хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Заключительная стадия инфильтрации — рассасывание влаги после окончания впитывания — описывается универсальной зависимостью

$$W = aT^{-b}, \quad (75)$$

где  $W$  — запас влаги в любом слое через  $T$  суток после прекращения впитывания;  $a$  — запас влаги через один день;  $b$  — эмпирический коэффициент. Например, для пылеватого песка уравнение имеет вид

$$W = 8,47 T^{-0,0782},$$

для тяжелого суглинка

$$W = 40,16 T^{-0,0332}.$$

Рассмотрим теперь другой важный процесс формирования запасов влаги в почве — подпитывание корнеобитаемого слоя почвы за счет капиллярного подъема грунтовых вод. Капиллярная подача воды снизу осуществляется под влиянием перепада капиллярных давлений между сухой почвой и грунтом, насыщенным водой. Максимальная высота поднятия воды в цилиндрическом капилляре описывается в упрощенной форме уравнением Жюрена

$$H = \frac{0,15}{r}, \quad (76)$$

где  $H$  — высота капиллярного подъема, см;  $r$  — радиус капилляра, см.

Эта формула позволяет получить лишь самое общее представление о размерах капиллярного поднятия, поскольку в реальных почвах строение порового пространства имеет весьма сложный характер. Почва представляет собой систему капилляров различного диаметра, которые связаны между собой «каналами». В соответствии с этим, капиллярный подъем происходит не сплошным фронтом, а отдельными языками. Вначале широкие капилляры быстро поднимают воду на небольшую высоту. Тонкие капилляры обладают значительной водоподъемной силой, но скорость подъема невелика. Таким образом, в песчаных почвах капиллярная кайма имеет небольшую мощность и формируется быстро, в глинистых — подъем происходит очень медленно и теоретическая максимальная высота может быть достигнута лишь за несколько лет и даже больше. На практике высоту капиллярного подъема определяют по эпюрам влажности, построенным над зеркалом грунтовых вод. В природных условиях мощность каймы над грунтовыми водами не превышает 5—9 м.

Капиллярная подача воды из грунтовых вод в корнеобитаемый слой может осуществляться лишь при наличии разности капиллярного натяжения верхних и нижних слоев почвы, что имеет место при расходе влаги на испарение или транспирацию. Отсюда ясно, что при выводе формул для количественной характеристики величины грунтового подпитывания необходимо учитывать как свойства грунта, так и метеорологические условия, и биологические особенности культур.

Основной метод учета притока влаги в почву из грунтовых вод — лизиметрический. На основе обобщения большого количества данных лизиметрических наблюдений разрабатываются методы количественной оценки влагообмена грунтовых вод с почвами по двум направлениям: вывод эмпирических зависимостей расхода грунтовых вод в зону аэрации ( $E_{гр}$ ) от основных определяющих факторов и поиск эмпирических связей  $E_{гр} = f(H_{гр})$  для разных культур и их аналитическая аппроксимация.

С. Ф. Аверьянов для ряда сельскохозяйственных культур получил выражение вида

$$E_{гр} = k_1 (k_2 E_0 - a H_{гр}^m), \quad (77)$$

где  $E_0$  — испаряемость, приравняваемая к испарению с открытой водной поверхности;  $k_1$  — поправочный коэффициент, зависящий от механического состава грунтов;  $k_2$  — модульный коэффициент, отражающий обеспеченность величины  $E_{гр}$  и, в первую очередь, обеспеченность  $E_0$  для любого расчетного года,  $a$  и  $m$  — эмпирические параметры, характеризующие биологические особенности

культуры, ее способность заимствовать влагу корневой системой, продолжительность вегетации.

Расчет по формуле (77) позволяет получить интегральное значение  $E_{гр}$  за весь вегетационный период.

С. И. Харченко [5], основываясь на исследованиях П. А. Летунова и А. А. Роде, дает выражение

$$E_{гр} = \frac{E_0}{e^{mH_{гр}}}, \quad (78)$$

где  $E_{гр}$  — среднесуточное испарение, мм/сут;  $H_{гр}$  — глубина залегания грунтовых вод, м;  $m$  — параметр, зависящий от фазы развития растений и свойств грунтов ( $m=0,7 \div 2,0$ ). Точность расчета по этой формуле 20—25%.

Каждая из приведенных формул имеет свои достоинства и недостатки. Так, в уравнении (78) не соблюдено одно из граничных условий — существование некоторой критической глубины ( $H_m$ ), при которой  $E_{гр} = 0$ . Формула (77) не дает возможности определить  $E_{гр}$  за короткие отрезки времени. Добавим к этому, что точность экспериментальных лизиметрических данных, согласно исследованиям института ВСЕГИНГЕО, невысока. Чтобы ошибка не превышала 10—25% при обеспеченности 80—95%, необходима по крайней мере шестикратная повторность опробования, т. е. не менее шести лизиметров должны характеризовать влагоперенос в данной точке. В настоящее время на балансовых площадках используются лизиметры с трехкратной повторностью в аридной зоне и четырехкратной — в гумидной.

В последние годы, в связи с широким развитием мелиоративных мероприятий, требования к качеству и количеству информации о режиме влагообмена на сельскохозяйственных полях значительно повысились. Проектирование оросительных норм с учетом капиллярного подпитывания не только ведет к экономии поливной воды, но и позволяет существенно снизить опасность вторичного засоления и подтопления плодородных земель. В связи с этим большое значение имеют исследования, проводимые в Валдайском филиале ГГИ, направленные на разработку методов расчета расхода грунтовых вод в зону аэрации по данным сетевых лизиметрических и агрометеорологических наблюдений. В результате исследований построены номограммы, позволяющие определять суточные расходы грунтовых вод в зону аэрации в зависимости от глубины их залегания и недостатка насыщения почвогрунтов по отношению к их наименьшей влагоемкости для различных культур (яровая и озимая пшеница, овес, ячмень, лен, картофель, клевер). Следует отметить, что зависимости имеют только региональное значение.

## 4. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ГРАФИКОВ ПОЛИВА И ГИДРОМОДУЛЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

### 4.1. Построение графиков полива

#### 4.1.1. Оросительная норма и ее практическая реализация

Оросительной нормой называют количество воды, которое необходимо дать при поливах сельскохозяйственных культур в период вегетации. Она должна восполнить дефицит водопотребления растений, т. е. разницу между суммарным (оптимальным, равным максимальному) водопотреблением и естественными ресурсами влаги. Различают оросительные нормы нетто  $M_{нт}$  (без учета потерь оросительной сети) и брутто  $M_{бр}$  (с учетом потерь). Величину  $M_{нт}$  (в м<sup>3</sup>/га) определяют по формуле

$$M_{нт} = E - H - \Delta W, \quad (79)$$

где  $E$  — суммарное водопотребление (м<sup>3</sup>/га);  $H$  — осадки за вегетационный период (м<sup>3</sup>/га);  $\Delta W$  — используемые запасы влаги в почве (м<sup>3</sup>/га)

$$\Delta W = W_n - W_k + J - I, \quad (80)$$

где  $W_n$  и  $W_k$  — запасы влаги в почве в начале и конце вегетационного периода;  $J$  — количество влаги, поступающей в расчетный слой за счет капиллярного подпитывания;  $I$  — потери воды на фильтрацию в глубинные слои почвы. Величина

$$M_{бр} = \frac{M_{нт}}{\eta}, \quad (81)$$

где  $\eta$  — коэффициент полезного действия оросительной системы.

#### 4.1.2. Проектный и эксплуатационный режимы орошения

Режим орошения разрабатывают двух видов: расчетный — для составления проекта орошения и эксплуатационный — применяемый на освоенном орошаемом массиве. Проектный орошаемый режим рассчитывают для года с определенным дефицитом влажности (расчетный год), обеспеченность которого устанавливают технико-экономическими расчетами, а иногда и просто по аналогии с другими мелиоративными системами. Расчетный год можно определить по средней величине оросительной нормы (при наличии длительного ряда наблюдений), необходимой сельскохозяйственным культурам в течение расчетного периода лет (обычно 75 или 95 лет из 100). По данным расчетного года вычисляют нормы, сроки и число поливов. Расчетный режим орошения определяют для каждой сельскохозяйственной культуры и для всего севооборота.

Потребность растения в оросительной воде за весь вегетационный период, т. е. оросительную норму  $M$  в  $\text{м}^3/\text{га}$ , определяют из уравнения водного баланса поля (79).

Величина ее зависит от требования культуры, природных условий, способа и техники полива и др. Так, для хлопчатника  $M$  составляет 6—10 тыс.  $\text{м}^3/\text{га}$ , для люцерны — от 2 до 12 тыс.  $\text{м}^3/\text{га}$ , для зерновых — 2,5—3 тыс.  $\text{м}^3/\text{га}$ . При дождевании оросительную норму уменьшают на 10—15%, а при осуществлении промывных режимов увеличивают на 10—30%.

Закономерность изменения поливных норм в течение вегетационного периода, как указывалось выше, чаще всего определяют по биологическим кривым. Глубина увлажнения почвы при поверхностном поливе составляет в начале вегетации от 0,3 м (для овощных культур) до 0,5—0,7 м (для трав), в конце периода — от 0,5 — до 1 м.

#### 4.1.3. Влияние размера орошаемых полей на поливной режим

Величина водопотребления зависит от площади орошаемого участка: по мере уменьшения площади интенсивность испарения обычно возрастает. Такая закономерность объясняется «краевым эффектом», возникающим на границе двух разных поверхностей, связанным с адвективным притоком тепла к испаряющей поверхности орошаемого поля, увеличивающим ее энергетические ресурсы.

Величина коэффициента  $k_S$ , учитывающего площадь орошаемого поля, зависит не только от размера самого поля и погодных условий, но и от степени увлажнения окружающей территории. В условиях сплошного орошения на больших площадях, когда орошаемый участок со всех сторон окружен такими же орошаемыми полями, этот коэффициент близок к единице. Обычно орошаемые поля окружены орошаемыми и неорошаемыми полями. В этом случае величина  $k_S$  будет больше единицы и зависит не только от площади выбранного орошаемого поля и погодных условий, но и от площади окружающих орошаемых и неорошаемых полей и их удаленности от выбранного нами поля. Соответствующие рекомендации приводятся в табл. 4 и на рис. 22. Они показывают, что если не учитывать влияние площади орошаемого поля, то возникают ошибки в 10—40% и более в сторону завышения оросительных и поливных норм для больших орошаемых массивов.

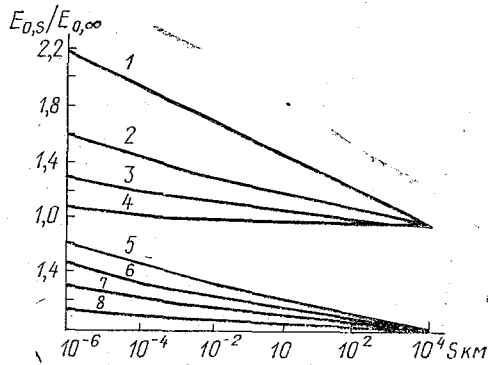
С точки зрения учета репрезентативности метеостанции, данные которой используются при расчете оросительного режима, интересны результаты сопоставления величин испаряемости, рассчитанные по пятидневкам за теплый период 1967 г. по данным раз-

Таблица 4

Значение коэффициента  $k_S$  в степной зоне в зависимости от площади орошаемого участка  $S$  и процента орошаемой площади

$\frac{S_{ор}}{S_{общ}} \times 100\%$	$S$ га												
	1	25	50	75	100	125	150	200	300	500	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>
0	1,33	1,31	1,27	1,25	1,22	1,22	1,21	1,21	1,21	1,20	1,20	1,11	1,06
25	1,25	1,22	1,20	1,18	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,14	1,07	1,03
50	1,16	1,15	1,12	1,11	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,05	1,01
75	1,06	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,01	1,01
100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

ноудаленных метеостанций, расположенных в пределах Ингулецкой оросительной системы и примыкающей к ней территории (Украина). Это сопоставление было выполнено путем построения автокорреляционной функции  $r(l)$ , представленной на рис. 23. Харис. 22. Зависимость отношения испаряемости  $E_{0,S}$  с орошаемых полей площадью  $S$  к величине испаряемости  $E_{0,\infty}$  с орошаемого поля «бесконечно большой» площади в различных климатических условиях: 1 — пустыня; 2 — степь, зона недостаточного увлажнения; 3 — лесостепь, зона достаточного увлажнения; 4 — тайга, зона избыточного увлажнения и в степной зоне в зависимости от степени увлажнения (процент от площади) окружающей метеостанцию территории (5—0%, 6—25%, 7—50%, 8—75%)



характеристикой репрезентативности в этом случае может служить величина коэффициента корреляции. Видно, что удаление орошаемого поля от метеостанции до  $l=20$  км вполне допустимо, так как

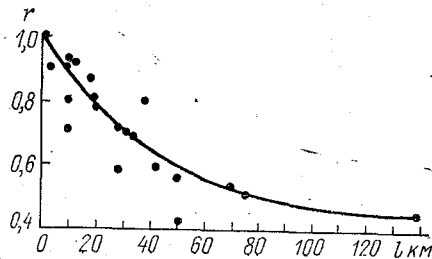


Рис. 23. Автокорреляционная функция пентадных значений испаряемости на орошаемых полях в зависимости от их расстояния до метеостанции

величина коэффициента корреляции при таком удалении составляет более 0,8. В отдельных случаях можно допустить отдаленность метеостанции до 40 км, поскольку величина  $r=0,65$  и в этом случае достаточно значительна. Если же для расчетов испаряемости подбирать более репрезентативные станции, то их удаленность от выбранных полей орошения может быть еще большей.

## 4.2. Графическое представление поливных норм и гидромодуля

### 4.2.1. Графическое представление метода расчета поливных норм

Расчетный режим орошения часто устанавливают с помощью расчетов по допустимому содержанию влаги в почве (графоаналитический метод). Строят три кривые допустимых запасов воды в почве — максимальный — соответствует наименьшей влагоемкости почвы  $W_{нв}$ , средний — соответствует влажности разрыва капилляров  $W_{рк}$  (т. е. нижней границы диапазона оптимальных влагозапасов почвы) и максимальный — соответствует влажности завядания  $W_з$ . Каждый из них зависит от мощности расчетного слоя почвы (рис. 24).

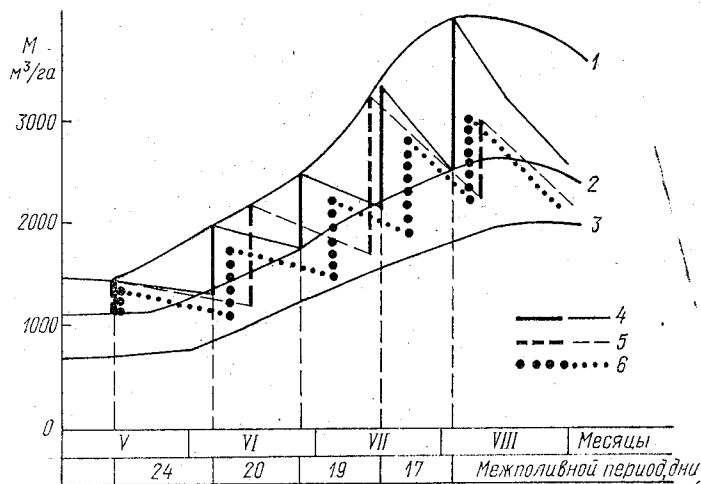


Рис. 24. Графический метод определения норм и сроков поливов (схема):

1, 2, 3 — кривые верхней  $W_{нв}$  и нижней  $W_{рк}$  границ диапазона оптимальных влагозапасов почвы и влажности завядания  $W_з$ ; 4 — кривая изменения влагозапасов почвы при оптимальном поливном режиме; 5, 6 — то же при ущемленном поливе, соответственно крупными редкими и малыми, но частыми дождями



Разность между этими запасами воды определяет максимально возможную величину поливной нормы в любой момент вегетационного периода в зависимости от водопоглащающей способности расчетного слоя почвы. При этом интервал влагозапасов почвы между  $W_{нв}$  и  $W_{рг}$  обычно считают соответствующим оптимальному увлажнению почвы, что обуславливает максимальную урожайность. Расчетный интервал, допускающий снижение влагозапасов от  $W_{нв}$  до  $W_3$  используют при определении режима орошения в условиях недостаточных водных ресурсов, когда применяются «ушеленные» поливы.

Расчетные величины поливных норм и сроки поливов определяются графическим построением на том же графике кривых изменения влажности в расчетном слое почвы под сельскохозяйственной культурой. Они строятся по результатам воднобалансовых расчетов по формуле (79). Кривые изменения влажности должны размещаться между кривыми  $W_{нв}$  и  $W_{рг}$  (оптимальный режим) и  $W_{нв}$  и  $W_3$  (при ограниченных водных ресурсах).

#### 4.2.2. Построение фактического и упорядоченного графиков гидромодуля

Режим орошения сельскохозяйственных культур определяют суммированием оросительных норм отдельных культур, чаще всего с помощью графика, у которого по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат — расходы воды, необходимые для подачи расчетных поливных норм. Для получения общего количества воды, необходимого для орошения всей площади севооборота, суммируют расходы, совпадающие по срокам. График показывает динамику требуемых расходов воды для орошения всей площади севооборота в любой момент вегетационного периода. Ординаты графика обычно выражают гидромодулем\*  $q$ , т. е. удельным расходом воды на 1 га орошаемой площади. Численные значения ординат определяются по формуле

$$q = \frac{\alpha h}{\tau 86,4}, \quad (82)$$

где  $q$  — удельный расход воды (гидромодуль), л/(с·га);  $\alpha$  — доля площади, занимаемой сельскохозяйственной культурой в севообороте;  $h$  — поливная норма, м<sup>3</sup>/га;  $\tau$  — поливной период, сут. (обычно колеблется в пределах 3—15 суток).

В результате построения получают неупорядоченный график гидромодуля или оросительного режима. Ординаты его резко различны, отражают перерывы в подаче воды и резкие пики ее расхода. Такой график необходимо упорядочить или, как принято

\* Название происходит от греческого слова *hýdor* — вода и латинского *modulus* — мера.

говорить, укомплектовать, по возможности приспособив его к режиму источника орошения и производительности насосов при механическом водоподъеме. Для этого изменяют в допустимых пределах продолжительности межполивных периодов, сохраняя оросительные нормы (рис. 25).

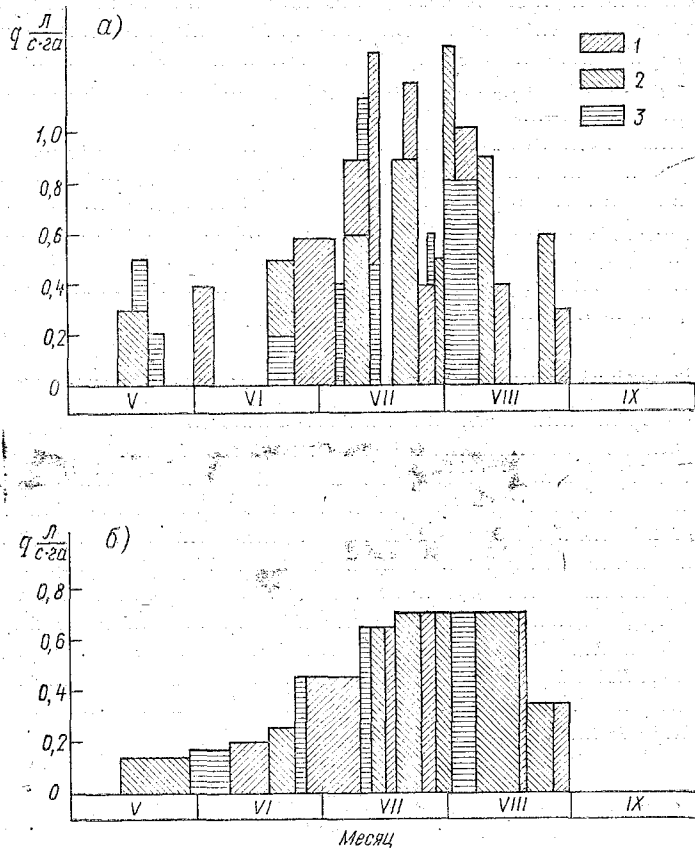


Рис. 25. График гидромодуля трехпольного севооборота (схема):  
 а — график фактической потребности в воде; б — укомплектованный график гидромодуля; 1, 2, 3 — культуры

Расчетными ординатами графика являются максимальные  $q_{\max}$  и минимальные  $q_{\min}$  ординаты укомплектованного графика. По ним определяют расчетные расходы оросительных каналов, подающих воду на севооборотный участок:

$$Q = qF_{\text{нт}} \quad (83)$$

Здесь  $Q$  — расчетный расход канала, л/с;  $q$  — расчетная ордината графика, л/(с·га);  $F_{ит}$  — площадь севооборотного участка, га.

С помощью этого графика составляют график-план работы оросительной системы или графический план ее водопользования. Так называется план использования водных ресурсов страны для нужд населения и народного хозяйства в порядке, установленном водным законодательством. При орошении к нему относятся также операции, связанные с забором воды из источника орошения и ее распределение между водопользователями — колхозами и совхозами.

Конфигурация графика гидромодуля и величины расчетных ординат различны для разных климатических зон, состава культур в севообороте, применяемых способов и техники поливов. Расчетные ординаты для хлопкового севооборота составляют, например, 0,7—1 л/(с·га). Для Поволжья, Украины и других регионов, где оросительная вода лишь дополняет естественные осадки, график гидромодуля характеризуется меньшими ординатами и часто имеет перерывы в подаче воды. Расчетные интервалы для зерновых севооборотов здесь 0,4—0,5 л/(с·га), рисовых — 3,0—6,0 л/(с·га).

На основании проектного, производственного и экспериментального материала для большинства регионов орошения СССР проведено гидромодульное районирование, т. е. составлены расчетные графики оросительного режима и определены расчетные ординаты. Это упрощает составление проектов орошения на первых стадиях проектирования. По данным режима орошения определяют расчетные режимы каналов, а следовательно, и их размеры (включая и магистральные каналы), объем работ при строительстве каналов и сооружений на них и в конечном итоге стоимость оросительной системы.

Для периода эксплуатации режим орошения сельскохозяйственных культур, как указывалось выше, определяется исходя из погодных, агротехнических и других условий каждого года. Эксплуатационный режим первоначально разрабатывают по средне-многолетним данным для лет с различным дефицитом влажности. Величина оросительной нормы и поливной режим крайне разнообразны не только для различных регионов орошения, но и для одного и того же участка в зависимости от погодных условий конкретного года, вида сельскохозяйственной культуры, сроков сева, запасов влаги к его началу. Эксплуатационный режим уточняют каждый год, учитывая изменение почвы под влиянием орошения, улучшение приемов агротехники, количество вносимых удобрений и повышение урожайности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов А. Р., Субботин А. С. Водный и тепловой режим орошаемых полей. Учебное пособие. — Л.: изд. ЛПИ, 1979.—80 с. (ЛГМИ).
2. Константинов А. Р., Субботин А. С. Методы нормирования орошения. Учебное пособие. — Л.: изд. ЛПИ, 1981.—74 с. (ЛГМИ).
3. Константинов А. Р., Химин Н. М. Применение сплайнов и метода остаточных отклонений в гидрометеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983.—216 с.
4. Константинов А. Р. Погода, почва и урожай озимой пшеницы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.—248 с.
5. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. Изд. 2-е. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975.—371 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<b>Глава 1. Использование биологических кривых водопотребления для оптимизации оросительных и осушительных режимов . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Биофизическая модель водопотребления растений и ее определяющие факторы . . . . .	6
1.2. Связь водопотребления растений с влагозапасами почвы и биологическими особенностями сельскохозяйственных культур . . . . .	9
1.3. Схема расчета поливных режимов . . . . .	13
1.4. Методика расчета оросительных норм и пример ее реализации для ЕТС . . . . .	17
1.5. Программирование урожайности с помощью биологических кривых при оптимальных, недостаточных и избыточных влагозапасах почвы . . . . .	19
<b>Глава 2. Использование физико-статистической модели формирования урожайности в качестве основы нормирования орошения и программирования урожайности на мелиорируемых землях . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1. Физико-статистическая модель формирования урожайности (на примере озимой пшеницы) . . . . .	25
2.1.1. Общие сведения о модели . . . . .	25
2.1.2. Погода теплого периода и урожайность . . . . .	27
2.1.3. Плодородие почвы и урожайность . . . . .	31
2.1.4. Оценка диапазона оптимальных влагозапасов почвы с учетом ее плодородия . . . . .	37
2.2. Дополнительные факторы и связи, учитываемые при программировании урожайности на мелиорируемых землях . . . . .	38
2.2.1. Связь урожайности с водопотреблением . . . . .	38
2.2.2. Влияние сроков выпадения и количества осадков (и поливов) на точность определения средних влагозапасов почвы . . . . .	42
2.2.3. Учет связи вертикального распределения влагозапасов почвы и корневой системы с водопотреблением сельхозкультур . . . . .	47
2.2.4. Эмпирическая модель корневой системы (на примере озимой пшеницы) . . . . .	49
<b>Глава 3. Основы осушения сельскохозяйственных полей . . . . .</b>	<b>54</b>
3.1. Общие сведения . . . . .	54
3.1.1. История развития осушения . . . . .	54
3.1.2. Технические средства осушения . . . . .	55
3.2. Принципы определения параметров осушительных мероприятий . . . . .	56
3.2.1. Взаимосвязь водного режима осушаемых почв с методами осушения . . . . .	56
3.2.2. Характеристики плодородия осушенных почв . . . . .	58
3.2.3. Связь плодородия с периодом после осушения . . . . .	60
3.2.4. Расчеты влагообмена в почве . . . . .	62

Глава 4. Основы расчета графиков полива и гидромодуля мелиоративных систем . . . . .	69
4.1. Построение графиков полива . . . . .	69
4.1.1. Оросительная норма и ее практическая реализация . . . . .	69
4.1.2. Проектный и эксплуатационный режимы орошения . . . . .	69
4.1.3. Влияние размеров орошаемых полей на поливной режим . . . . .	70
4.2. Графическое представление поливных норм и гидромодуля . . . . .	72
4.2.1. Графическое представление метода расчета поливных норм . . . . .	72
4.2.2. Построение фактического и упорядоченного графиков гидромодуля	73
Литература . . . . .	76

*Алексей Родионович Константинов*

**ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ НОРМИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ И ОСУШЕНИЯ**

**Учебное пособие**

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

Корректор *Р. В. Федорова*

---

Сдано в набор 24.05.83. Подписано в печать 29.12.83. М-33075. Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 4,9. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 500 экз. Зак. 349. Тем. план 1983 г. Поз. 153. Цена 20 коп. ДПИ имени М. И. Калинина. 195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

---

Типография ВВМУПП имени Ленинского комсомола