
В. Я. КУЛИК

ПРИКЛАДНЫЕ
РАСЧЕТЫ
НА ЭЦВМ
ВЛАГОПЕРЕНОСА
В ЗОНЕ АЭРАЦИИ



Москва «Недра» 1979

Кулик В. Я. Прикладные расчеты на ЭЦВМ влагопереноса в зоне аэрации. М., Недра, 1979, 160 с.

В книге описан простейший комплекс методов, применяющихся при анализе и расчете на ЭЦВМ миграции влаги в условиях неполного насыщения грунтов водой. Рассматриваются простейшие математические модели процесса, упрощенная методика определения гидрофизических характеристик грунтов, алгоритмы, применяемые для вычислений на малых и средних ЭЦВМ. На конкретных примерах показаны возможности использования расчетов для усовершенствования методики наблюдений, изысканий, анализа и прикладных расчетов. Описаны способы сравнения расчетов на ЭЦВМ с наблюдениями и зависимость точности расчетов от качества исходных данных. Изложение этого материала ведется с минимальным использованием математического аппарата и терминологии.

Книга рассчитана на гидрогеологов, геофизиков и специалистов смежных профессий. Может быть также использована преподавателями и студентами.

Табл. 8, ил. 34, список лит. — 116 назв.

К $\frac{20806-488}{043(01) - 79}$ 39—79. 120-1060000

© Издательство «Недра», 1979

ИБ № 1615

Виталий Яковлевич Кулик

ПРИКЛАДНЫЕ РАСЧЕТЫ НА ЭЦВМ ВЛАГОПЕРЕНОСА В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Редактор издательства Л. Н. Федорова
Обложка художника В. Т. Дружковой
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
Технический редактор Л. Я. Голова
Корректор Т. М. Столярова

Сдано в набор 11.06.79.
Формат 60×90^{1/16}.
Печать высокая.
Заказ 374/6661—2

Подписано в печать 19.09.79.
Бумага № 2.
Печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 10,44.
Цена 50 коп.

Т-17 222
Гарнитура литер
Тираж 1100 экз.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19
Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
Государственного комитета СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25.

Предисловие

Перечислим некоторые требования, которым должна удовлетворять техника прикладных расчетов влагопереноса в почвах.

1. Математическая модель должна быть возможно более простой, поскольку в практических расчетах точность исходных данных, вводимых в расчет, определяет погрешность расчета.

2. В уравнения должны входить только хорошо изученные гидрофизические характеристики почвы. Только в этом случае модель удастся немедленно использовать для анализа и расчетов.

3. Должна быть разработана простая методика определения характеристик почво-грунтов, не требующая применения уникальной аппаратуры. Если это условие не выполнено, методика оказывается полезной только для нескольких специализированных лабораторий в крупных научно-исследовательских центрах.

4. Алгоритм и программа расчета должны быть в достаточной степени универсальными, чтобы удовлетворять широкому диапазону условий, имеющих место на орошаемых и осушаемых массивах.

5. Расчет должен быть осуществим на серийных ЭЦВМ.

6. Должна быть разработана возможно более простая техника сопоставления с опытными данными.

7. Должна быть определена область применения и пределы применимости.

Книга составлена в соответствии с этими принципами.

Изложение начинается с описания простейших уравнений влагопереноса (глава 1). Здесь же приведены самые простые методы измерения гидрофизических параметров почвы, необходимых для расчетов на ЭЦВМ.

Проблема построения максимально простого и надежного алгоритма расчета обсуждается в главе 2. В следующей главе можно найти «тысячу мелочей», необходимых для реализации алгоритма на серийных ЭЦВМ.

В главах 4—6 даются примеры расчетов. Первая из этих глав посвящена в основном простейшей технике сравнения расчета с наблюдениями. В следующей даются примеры применения. Последняя глава — это анализ точности расчета и описание пределов, в которых прилично работает весь описанный комплекс.

Эта книга написана так, чтобы контакт между землеводами, физиками, математиками и работниками ВЦ стал более совершенным. Не знаю, насколько это удалось. Буду весьма благода-

рен всем, кто сообщит свои замечания по адресу: 191011, Ленинград, ул. Ракова, 19, СНИИГМ, Кулику В. Я.

Значительная разница в образовании и интересах этих специалистов диктовала весьма жесткий отбор материала. В книгу включены только такие вещи, о которых можно было написать достаточно просто. Ряд чисто технических и специальных проблем, а также некоторые новейшие поисковые исследования здесь не приведены.

Созданию этой книги в значительной степени способствовали Г. А. Алексеев, М. Н. Басмановская, Н. Ф. Бондаренко, Л. И. Варазашвили, Г. В. Верещагина, А. П. Вершинин, Л. Г. Гусева, Н. И. Дружинин, В. А. Злотник, В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, Е. Н. Кузнецов, Н. И. Ильин, Т. Н. Нижарадзе, С. В. Нерпин, Л. Б. Мартов, М. Г. Мурашко, Ю. Н. Рапопорт, Л. П. Розанцева, В. В. Романов, М. В. Петрова, Н. В. Пичугина, А. А. Соколов, Г. В. Трубачева и многие другие.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$c = \frac{dW}{dp}$ — дифференциальная влагоемкость, (м вод. ст.)⁻¹

$\approx 10^{-4}$ Па

D — диффузивность, м²/сут

E — испарение с поверхности почвы, м/сут

H — максимальная глубина УГВ, м

h — шаг по глубине почвы, м

i — пространственный (нижний) индекс у сеточной функции, $i=0, 1, 2 \dots$

j — временной (верхний) индекс у сеточной функции

k — коэффициент влагопроводности, м/сут

k_0 — коэффициент фильтрации, м/сут

M — величина полива, м/сут

N — номер узла, находящегося на УГВ

p — давление почвенной влаги (эквивалентное давление, всасывающее давление и др.), м вод. ст.
 $pF = \lg p$, где p берется в см вод. ст. (≈ 1 г Па)

$\vec{q}$ — поток влаги, м/сут

$\vec{q}(z=\xi)$ — поток влаги в зону аэрации из грунтовых вод (питание грунтовых вод, подпитка и др.), м/сут

$\vec{i}(z=0) = f_1(t) = X + M - E$ — поступление влаги к поверхности почвы, м/сут

T — расчетный период, сут

t — время, с (сут)

W — влажность почвы

$W_{\text{в.ч}} = u$ — влажность почвы, вычисленная на ЭВМ

X — интенсивность осадков, м/сут

z — глубина от поверхности почвы (вниз), м

α, β_i — коэффициенты прогонки

γ — удельный вес воды, Н/м³

Φ — вероятность превышения (обеспеченность) данной величины ошибки, %

ξ — уровень грунтовых вод (от поверхности почвы), м

ПВ — полная влагоемкость почвы

ММВ — максимальная молекулярная влагоемкость почвы

ВЗ — влажность завядания почвы

МГ — максимальная гигроскопичность почвы

ПРОСТЕЙШИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В ПОЧВЕ

1. УРАВНЕНИЕ ВОДНОГО БАЛАНСА

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1.1)$$

Рассмотрим кубик почвы с гранями в 1 см². Первый член уравнения — это изменение количества воды в этом кубике в единицу времени.

Поток q — это количество воды (см³), протекающей в единицу времени (с) через грань кубика (1 см²), а $\frac{\partial q}{\partial z}$ — разница потоков воды через верхнюю и нижнюю грани.

Таким образом, смысл уравнения прост: изменение количества воды в кубике может быть только из-за того, что через одну грань втекает больше (или меньше), чем вытекает через другую.

2. БАЛАНС СИЛ

$$\frac{q}{k} = - \frac{\partial (p + \gamma z)}{\partial z} \quad (1.2)$$

Величина $(p + \gamma z)$ — это гидравлический напор, складывающийся из давления жидкости и действия сил тяжести (гравитационное поле).

Обратимся снова к нашему кубiku почвы. Правая часть уравнения даст разность напоров на верхней и нижней грани. Это и есть сила, под действием которой вода течет в почве. Уравновешивает ее сила трения (левая часть уравнения). Поскольку течение ламинарное, сила трения пропорциональна потоку жидкости. Коэффициент k должен быть определен экспериментально.

Если ось z направить сверху вниз, то гидравлический напор будет равен $(p - \gamma z)$, и уравнение баланса сил будет иметь вид

$$q = -k \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \gamma \right); \quad (1.2a)$$

$$\gamma \approx 1.$$

Теперь у нас есть два уравнения, но неизвестных в них — четыре (w, q, k, p). Чтобы система уравнений давала однозначное решение, количество уравнений должно быть равно числу неизвестных.

3. УРАВНЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

$$k = f_k(W); \quad (1.3)$$

$$W = f_w(\rho). \quad (1.4)$$

Мы выходим из затруднения простейшим, хотя и не лучшим, способом.

Обратим внимание на некоторое различие между уравнениями (1.1), (1.2), (1.3), (1.4). Первое более похоже на некоторую общую философскую концепцию. Второе содержит в себе ньютонову идею равновесия сил, но менее стабильно. Уязвимое место этого уравнения — выражение для сил трения. Достаточно, например, скорости течения увеличиться, чтобы движение стало турбулентным, а силы трения — пропорциональными квадрату скорости. Известно также, что это уравнение нарушается при очень малых скоростях [8, 55, 65].

Еще менее общими являются уравнения (1.3) и (1.4). Сейчас хорошо известно, что при любых влажностях почвы и скоростях течения они точно не соблюдаются. Влагопроводность и всасывающее давление в любой момент не определяются синхронным значением влажности, а зависят от предшествующей истории процесса. Например, при сушке эти зависимости будут другими, чем при намокании почвы, и к тому же зависят от скорости изменения влажности, иначе говоря, зависимости (1.3) и (1.4) подвержены гистерезису.

Сейчас предложен целый ряд уравнений гидрофизических характеристик, которые гораздо лучше описывают опытные данные. И тем не менее в прикладных расчетах ими почти не пользуются и, по-видимому, долго не будут пользоваться по следующим причинам:

1) все эти уравнения гораздо сложнее. Между тем даже решение уравнений (1.1) — (1.4) для практически важных случаев — задача, лежащая где-то вблизи грани возможного общедоступных ЭВМ;

2) зависимости (1.3) и (1.4) существенно различны для разных почвогрунтов. Поэтому во всех случаях необходимо определять их опытным путем. Можно, подметив некоторые общие свойства этих зависимостей, несколько сократить объем полевых и лабораторных измерений (и такая работа сейчас ведется [54]). Но не делать их совсем нельзя.

Оказывается, что любое более точное уравнение гидрофизических характеристик требует резкого увеличения объема измерений;

3) несмотря на отмеченные выше недостатки, система уравнений (1.1) — (1.4) обеспечивает вычисление влажности почвы с точностью, сравнимой с той, которую дают стандартные наблюдения на сети станций весовым методом.

4. РАСЧЕТНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ

Для расчетов на ЭЦВМ желательно, пользуясь методом исключения, получить вместо системы (1.1) — (1.4) одно уравнение, притом хорошо известного, исследованного математиками типа. Тогда можно будет пользоваться уже имеющимися математическими разработками. Оперативная память многих общедоступных ЭЦВМ может просто не вместить четыре массива величин, но достаточна для одного.

Кажется естественным исключить все неизвестные, кроме влажности. Так и делали на первом этапе, когда все расчеты велись для однородного грунта. Но уже для слоистой почвы это приводит к ряду затруднений. Например, при дождях или поливах может временно образоваться верховодка; влажность становится близкой к полному насыщению; вода в почве течет довольно быстро, а между тем влажность в зоне насыщения не меняется, и производные ее по времени и глубине равны нулю.

Аналогичные трудности возникают, если исключить все, кроме влагопроводности.

Наиболее удобным для разработки достаточно общих алгоритмов оказывается уравнение

$$c \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial k}{\partial z}, \quad (1.5)$$

где

$$c = \frac{d f_w(p)}{d p}.$$

Это квазилинейное уравнение в частных производных второго порядка относительно хорошо изучено. Оно встречается в теории теплопроводности, физике высоких температур, космонавтике, мерзлотоведении.

Перед последним членом уравнения стоит знак минус, если ось z направлена вниз, и знак плюс, если вверх.

5. КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ

Для решения уравнения (1.5) надо прежде всего задать распределение давления влаги по глубине в некоторый исходный момент (начальное условие)

$$t = 0; \quad z > 0; \quad p = f_0(z). \quad (1.6)$$

Далее мы увидим, что расчет можно организовать таким образом, чтобы погрешность, с которой задается начальное условие, практически не влияла на точность результата.

Сложнее задать граничные условия, т. е. определить, что происходит на «крыше» и «дне» того столба почвы, водный режим которого мы должны рассчитать.

С чисто математической точки зрения на каждой границе можно задать либо давление, либо поток влаги, либо некоторую их комбинацию. На практике выбор того или иного варианта определяется тем, какая из этих величин может быть достаточно точно определена путем измерения или из общезначимых соображений.

Ниже приводятся некоторые варианты граничных условий, применявшиеся при массовых прикладных расчетах влагопереноса.

Почвенный лизиметр-испаритель с подпитывающим устройством

На нижней границе монолита подпитывающее устройство поддерживает постоянное давление, обычно близкое к нулю

$$t > 0; \quad z = \xi; \quad p = p_0 \approx 0.$$

Если стока с монолита нет, то все осадки рано или поздно инфильтруются, и поток влаги через поверхность почвы можно определить следующим образом

$$t > 0; \quad z = 0; \quad q = X + M - E = f_1(t).$$

Таким образом, сверху задается краевое условие второго рода, а внизу — первого рода.

Орошаемое поле, стока нет

По аналогии с предыдущим случаем можно задать граничные условия

$$t > 0; \quad z = 0; \quad q = X + M - E = f_1(t); \quad (1.7)$$

$$t > 0; \quad z = \xi(t); \quad p = 0. \quad (1.8)$$

Разница здесь только в том, что глубина, на которой давление равно нулю, «плавает», так как уровень грунтовых вод меняется во времени.

В полевых наблюдениях обычно применяют два вида скважин. Одни показывают уровень грунтовых вод (УГВ), другие (пьезометры) измеряют давление на некоторой глубине, ниже УГВ. Условие (1.8) предполагает использование первых для получения данных о ходе во времени УГВ.

С чисто математической точки зрения вполне можно использовать данные пьезометров, задавая, например, нижнее граничное условие в виде

$$t > 0; \quad z = z_0; \quad p = f(t). \quad (1.9')$$

На практике это редко удается. Опыт показал, что условие (1.9') очень сильно снижает точность расчетов по следующим причинам:

1) фильтрацию снизу вверх и сверху вниз в насыщенной зоне между УГВ и входом пьезометра не удается достаточно точно

рассчитать. Часто поток в грунтовых водах очень далек от одномерного или же вертикальная его составляющая очень мала по сравнению с горизонтальной. Величина коэффициента фильтрации обычно определяется с точностью до порядка [8, 60]. Естественно, что по неверным градиентам напора и неточным гидравлическим сопротивлениям влагообмен зоны аэрации и грунтовых вод вычисляется с большой ошибкой.

Часто в расчетах наблюдались случаи, когда поток снизу вверх настолько превышал разумные величины, что довольно быстро достигалось затопление зоны аэрации;

2) расчет всегда будет точнее, если задавать граничные условия как можно ближе к расчетной зоне. Между тем пьезометры обычно ставятся глубже самого низкого УГВ.

Условие (1.9) может дать повышенную точность расчета, если имеются данные отсчетов по тензиометру, установленному в зоне аэрации. Но такие наблюдения пока мало распространены.

Расчет влагопереноса в поле (общий случай)

Первые модели, алгоритмы и программы «Гидрофизика» были [53, 69] построены на основе граничного условия (1.7). Однако поток влаги через поверхность почвы не всегда равен алгебраической сумме осадков и испарения. При сильных дождях часть воды стекает по поверхности. Кроме того, методика расчета с применением граничного условия второго рода недостаточно универсальна. Невозможно, например, использовать такого рода программу для расчета инфильтрации при поливе затоплением и в других подобных случаях.

Краевое условие второго рода (1.7) целесообразно задавать только в периоды, когда идет испарение или дождь, полностью впитывающийся почвой. Как только поверхность достигла полного насыщения ($p=0$), необходимо перейти к краевому условию первого рода

$$z = z_0 = 0; \quad p = p_0 \approx 0. \quad (1.9)$$

Пока интенсивность дождя велика, поверхность почвы будет насыщена. Но как только интенсивность осадков уменьшится, влажность верхнего слоя почвы снова может стать меньше полной влагоемкости.

Чтобы уловить момент обратного перехода, надо на каждом шаге по времени сравнивать поток влаги, вычисленный при краевом условии (1.9), и интенсивность дождя. Как только интенсивность дождя станет меньше, надо переходить обратно к краевому условию второго рода (1.7).

Таким образом необходимо предусмотреть в программе некоторую «логику», автоматически переключающую в ходе расчета краевые условия. Это сделано, например, в программах «Гидрофизика-76» и «Гидрофизика-77» [69].

Этот подход позволяет также приближенно вычислять избыток воды, не впитываемый почвой («водообразование»).

Еще более точная формулировка краевых условий требует одновременного расчета влагопереноса в почве и поверхностного стока. Однако для этого надо уже решать двумерную (*плоскую*) или трехмерную задачу. Общедоступные ЭЦВМ пока имеют недостаточно большое быстроедействие, чтобы можно было применять такую постановку задачи в прикладных расчетах.

6. АВТОКОМПЕНСАЦИОННОСТЬ

Модель, пригодная для прикладных расчетов, должна удовлетворять ряду требований.

Некоторые из них были введены довольно давно и приняты на вооружение математиками. Любой курс математической физики формулирует требование корректности математической постановки задачи:

- 1) решение должно существовать (по крайней мере одно);
- 2) решение должно быть единственным;
- 3) решение должно непрерывно зависеть от исходных данных задачи (начальных и граничных условий, коэффициентов и др.).

Последнее условие означает, что при малых изменениях исходных данных решение не должно меняться скачком.

Однако чисто математической корректности недостаточно для того, чтобы модель можно было применять в прикладных расчетах.

Пример

Пусть расчет ведется по дифференциальному уравнению (1.5), а в качестве граничных условий заданы потоки через верхний и нижний торцы столба почвы (граничные условия второго рода). С математической точки зрения такая задача корректна.

Между тем, потоки влаги задаются всегда с некоторой ошибкой. Это могут быть не только случайные погрешности типа флуктуаций, но и *систематические*. Например, известно, что осадки и испарение почти всегда вычисляются или измеряются с систематическими ошибками. Еще более неточны существующие формулы для расчета потока через нижнее сечение столба почвы; измерения этих потоков с помощью специальных приборов (потокомеров) производятся всегда со значительными погрешностями.

Представим себе, что поток влаги через дно задается совершенно точно, а через поверхность — всегда преуменьшен, скажем на 10%. Тогда ошибка в расчете влагозапасов почвы будет непрерывно расти пропорционально времени. Например, при испарении в 10 мм/сут и систематической ошибке в 10% уже через 100 сут ошибка достигнет 100 мм.

Ясно, что такой метод расчета непригоден, хотя модель и является корректной с математической точки зрения.

Определение

Назовем автокомпенсирующей моделью такую, в которой случайные и *систематические* погрешности исходных данных не приводят к накоплению ошибок в результатах расчета.

Разумеется, модель может быть автокомпенсирующей в разной степени. Как минимум, мы должны потребовать, чтобы погрешность результатов расчета не возрастала неограниченно со временем, т. е.

$$t \rightarrow \infty; \frac{\delta p}{p} < A < \infty.$$

Но этого недостаточно. Было бы лучше, если бы и за конечные интервалы времени ошибка не возрастала, а, наоборот, сглаживалась.

Для рассмотренного выше примера это означает следующее. Пусть в какой-то день ошибка в заданном испарении или осадках достигла очень большой величины, а затем стала, как обычно, небольшой. Конечно, влажность в этот день будет рассчитана неправильно. Но надо добиваться чтобы на другой день влияние этой аномалии исходных данных было меньше, через два дня — еще меньше, и т. д.

Понятно, что мерой автокомпенсации будет время, за которое максимально возможная ошибка в исходных данных практически перестанет влиять на последующие результаты. Такая мера удобна тем, что ее очень легко определить опытным путем. Надо провести два раза расчет: один раз с обычными исходными данными, другой раз — введя в один из дней максимально возможную ошибку. Если через некоторое время оба варианта начнут давать разницу, скажем, в 0,001 от вычисляемой величины, то модель является автокомпенсирующей. Количество дней, потребовавшихся для «забывания», — это и есть время компенсации.

Сравнивая две разные модели путем расчетов по одним и тем же исходным данным, можно говорить, что одна из них более автокомпенсирована, чем другая.

Разумеется, время автокомпенсации — величина относительная. Она зависит, например, от того, для какого объекта проводятся расчеты, каков гидрометеорологический режим за период «забывания». Как увидим далее, разумно определять эту величину с точностью до порядка.

В заключение отметим, что автокомпенсационность вполне можно было бы назвать устойчивостью модели по отношению к ошибкам в исходных данных. К сожалению, этот термин настолько перегружен, что лучше лишний раз его не употреблять. В следующей главе его неизбежно придется употреблять, и притом в разных смыслах.

Отметим также, что под устойчивостью чаще всего понимают стабильность по отношению к случайным флюктуациям. Здесь же наиболее «вредный» случай — это систематические ошибки

конечной величины. Аналогично этому на часовой механизм всегда действуют как случайные помехи, обусловленные несовершенством изготовления деталей, так и систематические, вызванные изменением температуры. Последние обычно устраняются с помощью специальных *компенсационных устройств*.

Способы автокомпенсации

Автокомпенсационности можно достигнуть двумя путями. Во-первых, можно изменить сами исходные уравнения. Но такие *фиктивные* поправки нежелательны.

Во-вторых, можно задать краевые условия таким образом, чтобы компенсация осуществлялась как бы автоматически.

Первый (простейший) способ — это задать на одном из торцов столба почвы граничное условие первого рода (потенциал). Тогда, стоит только влажности в зоне аэрации увеличиться (или уменьшиться) по сравнению с истинной, как это вызовет усиление оттока (или притока) к этой грани.

Этот механизм автокомпенсации действует в модели, приведенной выше. Влагообмен с грунтовыми водами компенсирует ошибки в задаваемых величинах испарения и осадков, так что влажность рассчитывается более или менее правильно.

Однако такой компенсатор действует хорошо только при близком залегании грунтовых вод, т. е. в зоне достаточного или избыточного увлажнения, на орошаемых землях и др. В степи или пустыне УГВ может залегать на глубине 20—30 м. Здесь некоторую пользу может принести *второй* способ автокомпенсации, в виде переключающихся краевых условий при выпадении сильных дождей. Если к началу дождя влажность была больше, чем истинная, то впитается меньше. И наоборот. Таким образом, после каждого дождя или полива, сопровождающегося стоком, будет происходить как бы стирание ошибок в исходных данных за предшествующий период.

Третий способ автокомпенсации заключается во введении в расчет зависимости испарения от влажности. Большую часть времени с поверхности почвы происходит испарение. Естественно, что применять этот способ надо очень осторожно, чтобы не испортить модель.

Наиболее естественный и общий метод заключается в «склеивании» моделей влагопереноса в зоне аэрации и приземном слое воздуха. Тогда мы получим метод расчета влажности почвы, в который в качестве исходных данных будут вводиться вместо испарения непосредственно наблюдаемые величины (например, температура и влажность воздуха).

К сожалению, пока этот способ нельзя применить для прикладных расчетов. У поверхности почвы, в месте «склеивания» происходит целый ряд процессов, которые плохо изучены. Здесь

поглощается радиация, развивается флора, фауна, микроорганизмы, происходят вспашка и уплотнение почвы и др.

На первом этапе более разумным приближением может быть использование одного из гидрометеорологических методов расчета испарения как функции метеоусловий и влагозапасов почвы. Хотя эти методы довольно примитивны, они опробованы на очень большом материале.

Обычно испарение возрастает приблизительно как линейная функция от влагозапасов до тех пор, пока не достигает максимальной величины где-то вблизи полесвой влагоемкости (ПВ). Если исходные данные привели к преувеличению влажности, то испарение автоматически уменьшится, и в будущем расчетные величины будут приближаться к истинным. И наоборот.

Именно благодаря этому механизму многочисленные водно-балансовые методы расчеты влагозапасов дают удовлетворительные результаты, несмотря на то чрезвычайно плохо учитывают влагообмен в самой почве.

Установлено также, что испарение может снижаться при влажности почвы, близкой к полному насыщению. Основная причина этого — угнетение растительности. Этот фактор следует вводить в расчет очень осторожно, только при наличии непосредственных надежных фенологических наблюдений, подтверждающих, что растительность вымокает.

Дело в том что убывание испарения с ростом влажности — механизм, нарушающий автокомпенсацию. Уменьшив испарение, мы увеличим влажность, за следующий период испарение еще больше уменьшится и т. д. В результате образуется нечто вроде неустойчивого цепного процесса.

Технически осуществить расчет испарения можно двумя путями.

В первом случае можно на каждом шаге по времени рассчитывать испарение, влагозапасы и затем, проведя несколько итераций, добиться стабильных величин влажности поверхности почвы. Этот способ расчета, по-видимому, будет применяться в будущем, когда память и быстродействие общедоступных ЭВМ станут больше.

Сейчас это не всегда удается, потому что дополнительные массивы исходной метеоинформации приходится помещать в оперативной памяти ЭВМ, а дополнительные вычисления испарения и итерации увеличивают затраты машинного времени. Кроме того, сейчас существует довольно много различных способов расчета испарения. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, свою область и регион применения, своих приверженцев и противников. Многие из них требуют различных исходных данных. Таким образом, приходится строить большое количество программ для ЭЦВМ.

При этом наиболее простым оказывается второй путь. Разрабатываются отдельно программа для расчета влагопереноса.

и которую испарение входит как массив данных, и программы для расчета испарения. По данным первого приближенного расчета испарения вычисляются влажности, которые в свою очередь используются для расчета второго приближения величин испарения и т. д. Этот способ легко реализуется даже на небольших ЭВМ и обычно сходится довольно быстро. Следует учитывать, что реальная точность расчета испарения не более 20%, и как только между двумя последовательными итерациями расхождение становится меньше, можно закончить расчет.

Таким образом, описанная выше модель позволяет ввести в действие все три механизма автокомпенсации.

Оценка времени автокомпенсации

Рассмотрим первый механизм автокомпенсации.

Для оценки компенсирующего действия влагообмена зоны аэрации с грунтовыми водами проще всего применить анализ размерностей. Время автокомпенсации

$$\tau = f(k, \xi, \rho_k, \rho_{гр}, \rho_{нач}), \quad (1.10)$$

где в скобках стоят последовательно средние за период компенсации влагопроводность, УГВ, масштаб капиллярных сил, характерные величины давления на верхней границе и в начальный момент.

Приводя формулу (1.10) к безразмерному виду с помощью леммы, получим

$$\tau = A \frac{\xi}{k}, \quad (1.11)$$

где

$$A = A\left(\frac{\rho_{гр}}{\rho_k}, \frac{\rho_{нач}}{\rho_k}\right).$$

Здесь важно обратить внимание на то, что все факторы, от которых зависит время компенсации, изменяются слабо по сравнению с влагопроводностью.

Рассмотрим два крайних варианта: когда грунт совершенно сухой и полностью насыщенный. Из формулы (1.11) следует, что в первом случае время компенсации должно быть больше, так как средняя влагопроводность здесь меньше.

Оценим теперь время компенсации для разных грунтов, полагая что коэффициент A близок к единице (с точностью до порядка). Обычно влагообмен с грунтовыми водами наиболее интенсивен, когда УГВ лежит не глубже 3—4 м. Для этих условий песок со средней влагопроводностью 3 м/сут будет иметь время компенсации порядка 1 сут. Для суглинка со средней влагопроводностью $3 \cdot 10^{-3}$ м/сут время компенсации 10^3 сут, т. е. около трех лет.

Конечно, все эти оценки очень приближенные. Можно было

бы использовать квазианалитические решения и получить более точные цифры. Но сама величина коэффициента фильтрации определяется с точностью до порядка [60], так что это не имеет смысла.

Если нужна большая точность, то разумнее провести численные опыты для «сухого» и «мокрого» вариантов. Пример таких опытов будет описан в главе 6.

Рассмотрим второй механизм автокомпенсации. Предположим, что в результате большой ошибки в исходных данных грунт стал совершенно сухим, вместо того чтобы быть полностью насыщенным. Тогда для автокомпенсации потребуются впитывание слоя осадков (или поливов), равного полной влагоемкости. Таким образом, здесь время компенсации будет оцениваться периодом, за который выпадают осадки, равные полной влагоемкости. Для пустынных районов это — много лет, а для зоны избыточного увлажнения — несколько месяцев.

Аналогично для третьего механизма время автокомпенсации можно оценить как период, за который испарится слой воды, соответствующий полной или наименьшей влагоемкости. Мощность слоя почвы, из которого идет достаточно сильный восходящий ток к испаряющей поверхности, обычно не превышает 3 м. Отсюда получим время компенсации в несколько месяцев для южных районов с испарением порядка 10 мм/сут. Для регионов со скоростью испарения в 1 мм/сут — это уже больше года или несколько лет, если учитывать, что в холодный период года испарения практически нет.

Все эти оценки, конечно, очень приближенные, но они показывают, что разные механизмы автокомпенсации могут в определенных условиях иметь соизмеримое значение и хорошо дополнять друг друга.

Области применения автокомпенсации

Существует довольно много моделей, которые не только не автокомпенсированы, но даже основаны на постановке задачи, являющейся некорректной (в классическом смысле); несмотря на эти «недостатки» (а часто именно благодаря им), применение таких моделей иногда бывает полезно, в особенности при решении обратных задач.

Некомпенсированные модели влагопереноса могут быть полезны в исследовательских работах, а также при анализе погрешностей исходных данных. Последнее обычно необходимо при контроле качества наблюдений.

Производя расчет с некомпенсированной или слабо компенсированной моделью, мы довольно быстро получим неправильные результаты и должны будем забраковать какие-то исходные данные. Заменяя их «исправленными», повторяем расчет и снова проводим анализ.

В научных исследованиях некомпенсированные модели построены тем, что позволяют проверить те многочисленные гипотезы, которые обычно приходится принимать.

Например, в модели [5, 6, 80] были приняты следующие граничные условия

$$\begin{aligned} t = 0; \quad z > 0; \quad p &= p_0(z); \\ t > 0; \quad z = 0; \quad q &= X - E = f_1(t); \\ t > 0; \quad z = \xi(t); \quad q &= f_2(t); \\ t > 0; \quad z = \xi(t); \quad p &= p_0 \approx 0. \end{aligned}$$

Поскольку краевых условий здесь не три, а четыре, мы получаем аналог задачи Стефана. Такая постановка задачи даст возможность вычислять не только потенциал (или влажность), но и ход во времени уровня грунтовых вод.

Но зато поток через «дно» предполагается заданным в виде функции времени $f_2(t)$. Ясно, что стоит только допустить небольшую систематическую ошибку в исходных данных о потоках через верхний или нижний торец, как влажность почвы начнет неограниченно увеличиваться (или уменьшаться) пропорционально времени. Одновременно начнет повышаться УГВ.

Однако такую модель можно успешно применить для научных исследований. Существуют, например, различные формулы, описывающие поток из грунтовых вод в зону аэрации как функцию расстояния от дренажа и глубины его заложения. Вводя их в расчет в качестве нижнего краевого условия и анализируя расхождение между наблюдаемыми и вычисленными УГВ, мы получим представление о правильности этих формул [6, 80]. Выражение для потока через нижнее сечение почвенной колонны можно изменять до тех пор, пока оно не станет приводить к правдоподобным результатам.

Другая возможность — это расчет режима взвешиваемых лизиметров с наглухо закрытым дном. Мы твердо знаем, что поток через дно равен нулю, а поток через верхнее сечение измеряется с помощью взвешивания лизиметра. Конечно, никаких невязок здесь быть не может, так как точная согласованность потока и изменения влагозапасов гарантируется самим методом измерения.

Таким образом, компенсированные и некомпенсированные модели имеют различные области применения.

7. УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ

Опыт массовых расчетов и приближенный теоретический анализ показывают, что на точность расчетов больше всего влияет погрешность определения гидрофизических характеристик поч-

вы. Метеорологические наблюдения — если они удовлетворяют существующим стандартам — обычно влияют гораздо меньше.

Инструментальная погрешность определения гидрофизических характеристик и известные расхождения в результатах измерений различными методами мало существенны. Главную роль играет пространственная изменчивость свойств почвы. Если в расчет вводятся величины, измеренные на «близлежащих» или «аналогичных» участках или просто принятые по литературным данным, результаты, как правило, получаются плохими.

Для расчета обычно необходимы две гидрофизические характеристики: зависимость потенциала от влажности и влагопроводность. Если почва мерзлая, то надо знать и некоторые другие ее свойства, но все они могут быть рассчитаны по этим двум.

Влагопроводность почвы вычисляется с достаточной для прикладных расчетов точностью по измеренному коэффициенту фильтрации [9, 10, 18, 82]. Техника измерения последнего хорошо разработана.

Измерение зависимости потенциала от влажности, называемой также основной гидрофизической характеристикой (ОГХ), в настоящее время производится только в нескольких специализированных лабораториях.

Аппаратура для определения ОГХ серийно не выпускается. Разработанные к настоящему времени многочисленные конструкции [18] позволяют проводить прекрасные специализированные исследования физики процесса. Вместе с тем общеизвестно, что они весьма капризны в работе и требуют высококвалифицированного персонала. Обычно наладить эти (на первый взгляд весьма примитивные) приборы не удается до тех пор, пока аналитики не пройдут стажировку на действующих прототипах.

Кроме того, каждый из этих приборов позволяет определять ОГХ только для некоторой части наблюдаемого в природе диапазона изменения влажности. Между тем, для прикладных расчетов на ЭВМ необходимо иметь ОГХ для влажностей, меняющихся по крайней мере от ПВ до МГ. ОГХ, как и другие свойства почвы, подвержена пространственной вариации [13, 62] и должна определяться в соответствующей повторности. Существующая аппаратура не позволяет достаточно быстро проводить определение ОГХ достаточно большого количества образцов почвы. Поэтому анализы приходится иногда вести в течение многих месяцев.

В ходе массовых прикладных расчетов на ЭВМ гидрологического режима почвогрунтов был доработан и доведен до стадии практического применения упрощенный метод определения ОГХ, не имеющий указанных выше недостатков [27]. ОГХ, измеренные этим методом, были применены для анализа и расчетов на ЭВМ.

Цель этого раздела — возможно более подробно описать технику таких измерений, чтобы каждый, кому это понадобилось,

мог провести их, пользуясь *обычным оборудованием* для определения влажности почвы. Мы надеемся, что это будет способствовать более широкому внедрению в практику расчетов и наблюдений на сети станции моделей влагопереноса, прогноза урожая и др., в которых в качестве одного из исходных параметров используется ОГХ.

Основные принципы

Если имеются два образца разных пористых материалов, приведенные в контакт, то со временем потенциалы их должны стать равными. Это следует из самого определения понятия потенциала (давления) как силы, обуславливающей движение.

Предположим, что для одного из этих образцов (*сенсора*) известна зависимость потенциала от влажности (тарировочная кривая сенсора). Зная влажность сенсора после растыковки достаточно долго выдержанных образцов, можно по тарировочной кривой определить его потенциал.

Для другого (испытываемого) образца мы можем измерить влажность, а потенциал будет таким же, как у сенсора. Такие измерения можно проводить при разных влажностях испытываемого образца.

Таким образом, зная тарировочную кривую сенсора, мы можем определить ОГХ любого образца почвы.

В качестве сенсора используют обычно какой-либо искусственно пористый материал, свойства которого изменяются относительно мало, например фильтровальную бумагу.

Идея этого метода была известна, по-видимому, еще в прошлом веке и довольно широко использовалась химиками для некоторых специальных анализов. В 30-х годах сенсоры использовались А. В. Лыковым [49] для исследований тепловлагопереноса и Гарднером [108] для изучения влагопереноса. После изобретения в 40-х годах специальных приборов (мембранных и пластинчатых прессов) этот метод почти не применялся. В 60-е годы, когда возникла необходимость проведения большого количества определений, метод сенсора снова начал применяться в СССР и за рубежом [105, 114].

Следует отметить, что точность определений этим методом зависит от точности тарировки сенсора. Так, например, Гарднер [108], использовавший для тарировки центрифугу, получил ошибочные результаты вследствие общезвестной сейчас систематической ошибки определения потенциалов в поле центробежных сил [114].

Опыт показал, что когда нет возможности часто проводить тарировку, нельзя пользоваться обычной листовой фильтровальной бумагой. Лучше применять пачки фильтров определенного сорта, выпускаемых определенным заводом. Например, американские гидрологи пользуются фильтрами диаметром 5,5 см фирмы Шлейхер и Шуль [105, 108, 114].

В течение 1969—1971 гг. в лаборатории гидрофизики почв СНИИГиМ были испытаны отечественные бумажные фильтры завода «Чистые соли». Тарировочная кривая для этого сенсора была измерена различными способами. В частности, фильтры закладывались в специальные капилляриметры, мембранные и пластинчатые прессы. Использовался также гигроскопический метод. Велись определения путем стыковки с образцами пористых сред и почв, которые были предварительно доведены до известного значения потенциала.

После получения тарировочной кривой в течение продолжительного времени велись параллельные измерения ОГХ различных почв с помощью метода сенсора и другими методами.

Опыт этих работ показал, что хотя вариация капиллярных свойств фильтров имеет место, она на порядок ниже, чем у почв, и может не приниматься во внимание. Таким образом, можно, по-видимому, использовать единую тарировочную кривую для всех фильтров данного сорта и размера, выпускаемых одним и тем же заводом.

Гистерезис тарировочной кривой можно не учитывать, так как методика построена таким образом, что фильтры работают только на увлажнение.

Уравнение тарировочной зависимости сенсора

Тарировочная кривая обеззоленных бумажных фильтров с белой обмоткой диаметром 9 см, выпускаемых заводом «Чистые соли» (ст. Загорск Московской области*) приведена на рис. 1. Для сравнения на этом же рисунке помещены данные для фильтров фирмы Шлейхер и Шуль, полученные отделом водных ресурсов департамента геологических работ США и *неправильная* тарировка Гарднера для этого же сенсора.

Можно построить сложное уравнение, описывающее всю кривую, но это нецелесообразно. Более удобной является кусочно-линейная аппроксимация.

1. Для давлений выше 34 атм (3,4 МПа) при влажности бумаги менее 15% от сухой массы:

$$pF = 6,568 - 0,135 W.$$

2. Для давлений $34 \geq p \geq 0,19$ атм (0,019 МПа) при влажности бумаги от 15 до 51% от сухой массы:

$$pF = 5,473 - 0,062 W.$$

3. Для давлений меньше 0,19 атм (0,019 МПа) при влажности бумаги более 51% от сухой массы:

$$pF = 2,826 - 0,0101 W.$$

* Фильтры этого сорта могут быть заказаны по данному адресу или через систему снабжения.

В эти формулы подставляется значение влажности в процентах от массы сухого фильтра. Например, при влажности в 10%

$$pF = 6,568 - 0,135 \cdot 10 = 6,433,$$

где $pF = \lg |p|$; p в см вод. ст.

Образцы почвы необходимого размера могут отбираться в поле или вырезаться из покрытых парафином монолитов непосредственно в лаборатории. Удобно доставлять монолиты в цилиндрах почвенных испарителей. При транспортировке образцов никогда не удастся полностью избежать возникновения трещин. Поэтому желательно после перевозки промочить образцы почвы дистиллированной водой, выдержать несколько дней, а затем

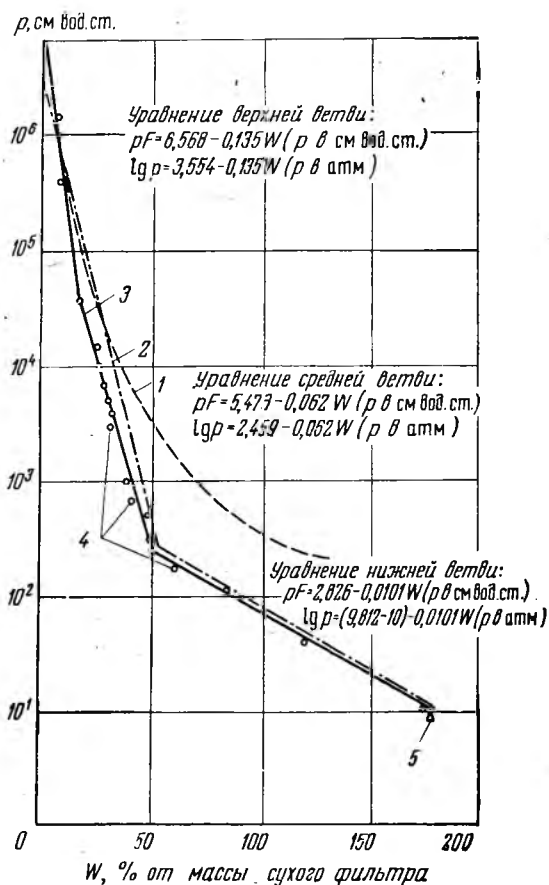


Рис. 1. Тарировочные кривые бумажных фильтров-сенсоров.

Фильтры Шлейхер и Шульц: 1 — по Гарднеру [109], 2 — по Аль-Хафаф, Хэнкс, Маквину и Миллеру [105, 115]; 3 — фильтры завода «Чистые соли»; 4 — экспериментальные точки дают представление об изменчивости свойств отечественных фильтров; 5 — предельная влагоемкость сенсора

подсушить. Трещины «заживают», и нижняя часть ОГХ, соответствующая малым pF , получается более точной.

Техника определения

I. Подготовка фильтровальной бумаги к опыту

1. При работе по определению зависимости потенциала почвенной влаги от влажности почвы в качестве сенсоров используются обеззоленные бумажные фильтры с белой обмоткой диаметром 9 см, выпускаемые заводом «Чистые соли».

2. Кружки фильтровальной бумаги во избежание микробиологического разложения предварительно пропитываются 2%-ным спиртовым раствором пентахлорфенола и высушиваются.

3. Подготовленные фильтры высушиваются в термостате при $+80^{\circ}\text{C}$ в течение суток и взвешиваются. Масса фильтров записывается в таблицу.

II. Подготовка образцов к опыту

1. Диаметр почвенных образцов должен соответствовать диаметру используемых при работе фильтров. Лучше всего размещать образцы почвы с ненарушенной структурой в чашки Петри* диаметром 9,5 см. Чашки Петри с образцами устанавливаются в помещении, где поддерживается постоянная температура.

2. Опыты проводятся с образцами ненарушенной структуры. Образцы вырезаются из монолита с помощью кольца, диаметр которого соответствует диаметру чашки Петри.

III. Ход определений

1. Чашки Петри предварительно взвешиваются пустыми. Их вес заносится в графу табл. 1. Из одного почвенного монолита выбирается 30—40 образцов, которые размещаются в пронумерованные чашки Петри.

2. Параллельно с отбором образцов определяется начальная влажность исследуемого почвенного монолита с 10-кратной повторностью и записывается в графу 5 табл. 1.

3. Чашки Петри, заполненные почвенными образцами, снова взвешиваются. Масса их заносится в графу 4 той же таблицы. Разность значений в графах 4 и 3 дает вес почвенного образца, находящегося в чашке Петри.

4. Зная начальную влажность образца и его массу, можно рассчитать, какое количество влаги нужно прибавить к образцу для создания в нем различной влажности.

5. В почвенный образец добавляется определенное количество дистиллированной воды, которое фиксируется в графе 6

*Могут быть использованы любые сосуды, закрываемые достаточно плотно, чтобы избежать испарения.

Таблица 1

Результаты измерений

№ оп.	№ чашки Петри	Масса чашки Петри, г	Масса чашки Петри с образ- цом, г	Началь- ная влаж- ность образца, %	Количество воды, добавлен- ное в образец, мл	Влажность фильтра после расстыков- ки с образцом	Потенциал влаги фильтра, вычислен- ный по формуле. см. вод. ст.	Влажность почвенного образца после рассты- ковки, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	206	317	5,3	0	27,0	6400	5,7
2	5	221	348	5,7	3,0	30,9	3600	7,2
3	8	214	325	5,6	5,0	38,3	1250	9,4
4	14	210	314	4,9	10,0	67,1	140	11,3
5	17	198	322	5,1	12,0	79,7	98	12,3
6	24	217	344	5,9	19,0	104,3	60	17,0

табл. 1, образец накрывается крышкой и выдерживается в течение 1—2 сут для достижения равномерного распределения влаги в нем.

6. На каждый увлажненный образец накладывается по два фильтра. Один из них — промежуточный, другой — рабочий. Через промежуточный фильтр осуществляется контакт фильтра с почвенным образцом. Наличие промежуточного фильтра предотвращает прилипание к рабочему фильтру почвенных частиц.

7. Образец накрывается крышкой и устанавливается в термостатированном помещении. Время выдерживания фильтров в контакте с почвенным образцом зависит от влажности последнего. Чем меньше влажность образца, тем больше времени требуется для установления термодинамического равновесия в системе фильтр — почва.

8. Время выдерживания фильтра на образце устанавливалось опытным путем. При влажностях, близких к полному насыщению, время выдержки около 1—2 суток. При влажностях меньше ВЗ, время контакта фильтра с образцом должно быть около 10 дней*. Таким образом, за 10 сут можно получить данные для построения влажностной кривой данной почвы во всем диапазоне влажностей, от МГ до полного насыщения.

9. Снятые с образцов рабочие фильтры быстро взвешиваются, высушиваются, снова взвешиваются. Определяется влажность фильтра после расстыковки с почвенным образцом. Значение влажности фильтра заносится в графу 7 табл. 1. По одной из формул, приведенных выше, определяется давление влаги в фильтре по значению его влажности. Значение давления заносится в графу 8 табл. 1.

* При выдержке образца в течение 2 сут при малых влажностях почвы могут возникать погрешности, обусловленные плохим контактом почвы с сенсором [105].

10. Одновременно с определением влажности фильтра почвенный образец из чашки Петри размещается в 5—6 бюксах и определяется его влажность, которая заносится в графу 9 табл. 1.

11. По данным граф 8 и 9 табл. 1 строится кривая $p(W)$ для исследуемого почвенного образца.

Пределы применимости методики

Значительные погрешности могут возникнуть, если чашки Петри с сенсором и почвой выдерживаются на солнце (например, на подоконнике лаборатории). Причина — перегонка пара из образца и осаждение капель на стенках чашек Петри. Лучше всего выдерживать образцы в подвале или другом темном помещении.

При влажности значительно меньше максимальной гигроскопичности, метод сенсоров становится недостаточно точным. Не рекомендуется «экстраполировать» тарировочную зависимость за пределы, указанные выше. Если для специальных целей необходимо определить ОГХ при очень больших значениях pF , необходимо использовать гигроскопический метод (выдерживание образца почвы над растворами солей [18]).

Метод сенсоров нельзя применять для анализа образцов сильно засоленных почв. Его можно применять для определения свойств, которые будут иметь эти почвы *после* тщательной промывки (мелиорация).

Для повышения точности определений желательно выдерживать образцы с сенсором в термостате. Если термостата нет, то применяется обычный деревянный ящик, стенки которого теплоизолируются (стружкой, соломой). Влияние температуры на точность определения незначительно [105]; цель термостатирования — избежать резких *колебаний* температуры, вызывающих термоперенос влаги в образце и осаждение капель воды на стенках чашки Петри.

Определенные данным методом ОГХ некоторых почв приведены в табл. 3 и 4, а также на графиках в главах 4, 5 и 6. Там же можно найти значения влагопроводности этих почв, вычисленные по формуле А. И. Будаговского.

ОТ УРАВНЕНИЯ К РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ

Только в некоторых самых элементарных случаях исходное уравнение полностью определяет технику вычислений. Даже простое алгебраическое уравнение

$$a y^4 + b y^3 + c y^2 + d y = e$$

можно решать по-разному: с помощью громоздких формул, путем подбора, методом последовательных приближений и др.

Методы решения дифференциальных уравнений еще более разнообразны. Мы опишем здесь только две группы методов, которые понадобятся нам в дальнейшем.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Обычно мы почти автоматически оперируем некоторыми простейшими видами функций. С помощью электронного арифмометра, математических таблиц, логарифмической линейки мы умеем проводить вычисления по формулам, в которые входят эти функции. А главное — и это гораздо важнее — образуется прочное интуитивное представление о том, как выглядят они на графике, какие имеют особенности.

Поэтому когда удастся получить аналитическое решение уравнения (1.5) в виде некоторой комбинации известных нам функций, мы имеем довольно ясное интуитивное представление о его свойствах. Но пока это сделано только для очень простых задач движения влаги в однородном грунте при некоторых «удобных», но очень сильно идеализированных краевых условиях. Сводка большого количества таких решений приводится в ряде работ [8, 31, 35, 52, 53, 81].

Трудности возникают прежде всего потому, что пока даже характеристики почвы S и K мы не умеем выразить в виде достаточно универсальных формул. Неизвестно, возможно ли это вообще. Есть частные эмпирические формулы, применяемые в узком диапазоне влажности. Но именно в данном расчете, для данной почвы эти формулы могут оказаться неверными.

Таким образом, в общем случае приходится искать решения, которые не изменяются при изменении характеристик почвы. Существует весьма узкий класс так называемых *автомодельных* решений, которые обладают такими свойствами. Но эти решения соответствуют очень идеализированным граничным условиям.

Известно довольно много решений, которые получены для

«удобного» (с математической точки зрения) вида гидрофизических характеристик. Это абсолютно точные решения, но можно дать гарантию, что почвы с точно такими свойствами не существует.

Описанные выше недостатки автомоделных решений привели к появлению большого количества *квазианалитических* приближенных решений. Разобьем их условно на два класса.

Первый класс — это решения в виде некоторого ряда (обычно степенного). Подставляя его в дифференциальное уравнение, находят некоторые соотношения, связывающие коэффициенты ряда и гидрофизические характеристики почвы.

Недостатки этого подхода заключаются в следующем. Во-первых, почти никогда не удается доказать, что ряд сходится, или хотя бы найти область, в которой он сходится. Например, Дж. Филип [28], производя расчеты некоторых простейших случаев инфильтрации с помощью степенных рядов, обнаружил, что решение явно расходится для достаточно больших моментов времени. Во-вторых, уравнения, по которым находят коэффициенты ряда, обычно оказываются довольно сложными, и решение их в свою очередь требует применения какой-либо квазианалитической техники или ЭВМ. В-третьих, почти никогда не удается получить теоретическую оценку ошибки, которую мы допускаем, отбрасывая «хвост» ряда.

Почвенно-гидрологические процессы довольно хорошо изучены экспериментально. Достаточно опытный исследователь имеет обычно интуитивное представление о том, как выглядит искомое решение. Используя эту информацию, можно попытаться выразить решение в виде некоторой простой формулы, отличной от степенного ряда. Можно также ввести некоторые упрощающие допущения о малости или постоянстве производных, преобразовать и упростить исходное уравнение. Подставляя в него формулу, определяют ее параметры и некоторый «остаточный» член. Рассматривая это решение как первое приближение, можно организовать итерационный процесс для получения более точного ответа.

В результате применения такой техники, близкой к обычному методу подбора, сейчас имеется второй класс квазианалитических решений. Для нахождения их фактически нет готовых рецептов. Очень часто такие решения громоздки, особенно при использовании итераций.

Общим недостатком обоих классов квазианалитических решений является то, что обычно не удается получить теоретической оценки точности решения. Некоторые авторы делают сравнение с расчетами на ЭВМ и считают, что получили оценку точности. Но это не так. Как мы увидим в следующей главе, метод конечных разностей пока не позволяет получить гарантированной точности решения. Кроме того, совпадение с конечным коли-

чеством вычислений на ЭВМ не гарантирует того, что последующие расчеты не начнут существенно различаться.

Таким образом, в отличие от автомоделных решений квантально-аналитическая техника не позволяет получить заданную наперед точность. Но зато вид гидрофизических характеристик и граничных условий обычно жестко не ограничен. А главное, все еще сохраняется возможность представить решение в обозримом, интуитивно доступном виде.

При расчетах на ЭЦВМ методом конечных разностей аналитические решения могли бы оказать большую пользу в ходе обобщения результатов вычислений. Можно было бы получить из них информацию о том, какие именно графики лучше всего строить, как выбрать координаты, масштабы и шкалы, чтобы линии были близки к прямолинейным, удобны для интерполяции, наглядны.

К сожалению, мы пока не имеем даже очень приближенных аналитических решений задач, поставленных в первой главе. Это еще предстоит сделать.

2. МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Дифференциал любой величины можно найти как разность значений в достаточно близких точках, а производную — как отношение разностей. Например,

$$\frac{\partial W}{\partial t} \approx \frac{W(z, t + \Delta t) - W(z, t)}{\Delta t}; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} \approx \frac{q(z + \Delta z, t) - q(z, t)}{\Delta z}. \quad (2.2)$$

Если мы запишем все производные в расчетной системе уравнений в виде разностей, то вместо дифференциальных уравнений получим алгебраические.

Таким образом, задача сводится к решению обычной алгебраической системы уравнений.

Конечно, переход от дифференциальных уравнений к разностям — это приближение, но мы знаем, что погрешность может быть сделана как угодно малой, если взять достаточно малые величины разностей.

Итак, идея метода очень проста и универсальна. Она не требует никаких упрощений в исходных уравнениях, краевых условиях, формулах или таблицах гидрофизических характеристик. Любую задачу влагопереноса можно рассчитать без натяжек и искусственных предположений.

Сетки

Проводя наблюдения за влажностью почвы, обычно берут пробы с шагом по глубине 0,1 м, а по времени — 10 сут.

При построении хроноизоплет мы наносим точки, соответствующие глубине и времени, и около каждой из них выписываем наблюдаемую влажность почвы. Если провести через эти точки вертикальные и горизонтальные линии, то получится решетка. Вид ее характеризует разрешающую способность и частоту замеров.

Часто наблюдения производятся с разным шагом по времени, чтобы уловить более точно особенности водного режима почв. Например, на орошаемых полях стараются дополнительно к ежелекдадным наблюдениям измерять влажность до и после поливов. Зимой, когда влагозапасы изменяются медленно, обычно берут пробы не чаще чем раз в месяц. Шаг по глубине также может изменяться. Во многих случаях на глубинах более 1 м берут пробы через 20, 50 и даже 100 см. Иногда проводят ежелекдадные наблюдения на глубину 1—1,5 м и более редкие замеры влажности на больших глубинах, где режим относительно стабилен. Брать пробы на влажность весовым методом разрешается только спустя 2—3 дня после сильного дождя или полива. Поэтому ежелекдадная периодичность наблюдений может нарушаться. Наконец, нередко случается, когда часть наблюдений приходится браковать вследствие низкого качества.

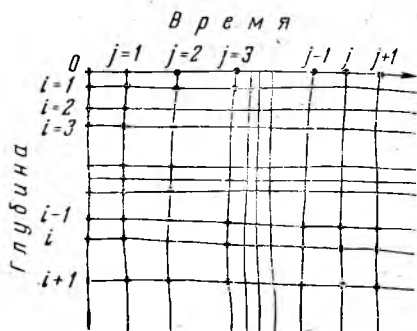


Рис 2. Эскиз сетки

В результате всех этих причин вместо красивой решетки получается что-то похожее на старую рыболовную сеть. Некоторых узлов не хватает, кое-где зияют дыры. Это — *сетка наблюдений* (рис. 2).

При расчете методом конечных разностей мы можем разбить красивую равномерную сетку с шагом по глубине Δz , а по времени Δt и вычислить значения влажностей, потенциалов, потоков в узлах этой сетки.

Величина шагов по глубине и времени определяется в первую очередь задачей расчета. Если надо просто сравнить наблюдения и теорию, то шаги можно брать не больше, чем минимальный шаг сетки наблюдений. Во всяком случае надо стремиться к тому, чтобы можно было рассчитать влажность во всех узлах сетки наблюдений. Если же нужно достаточно точно выявить особенности водного режима почвы, то сетка должна быть более густой.

Обычно нет смысла брать шаг по глубине меньше 10 см: разрешающая способность наблюдений весовым методом всегда меньше, а для прикладных расчетов более тонкие детали водного режима почв обычно не имеют значения.

Минимальная величина шага по времени определяется временной изменчивостью водного режима и, следовательно, скоростью изменения краевых условий. Наиболее нестационарная картина обычно наблюдается при дождях и поливах. Поскольку самописец интенсивности дождя (плювиограф) имеет разрешающую способность порядка 5 мин, то это и будет минимальная величина шага по времени.

Итак, для прикладных расчетов вполне достаточно иметь величины влажности в узлах равномерной сетки с ячейкой $10 \text{ см} \times 5 \text{ мин}$. Это — *сетка водного режима*.

Проводя расчет методом конечных разностей, мы решаем системы алгебраических уравнений. Неизвестные величины, которые приходится вычислять — это значения влажности в узлах сетки.

Независимо от физики процесса и методики наблюдений сама техника расчета выдвигает два противоречивых требования. С одной стороны, желательно сделать ячейку сетки поменьше. Тогда конечные разности будут точнее соответствовать дифференциалам и погрешность расчета будет меньше. С другой стороны — чем меньше ячейка сетки, тем больше вычислений надо делать, тем больше машинного времени займет расчет.

Символика конечных разностей

Много лет назад Лейбниц придумал простую и удобную систему записи дифференциальных уравнений.

К сожалению, до сих пор никому не удалось изобрести универсальную символику, с помощью которой разностные уравнения можно было бы записывать столь же наглядно, компактно и просто. Поэтому обычно применяется несколько разных систем обозначений. Мы всегда будем использовать ту систему записи, которая дает возможность записать расчетные уравнения в виде возможно более коротких формул.

Простейшая система символов позволяет примерно вдвое уменьшить количество значков:

$$\tau \equiv \Delta t;$$

$$h \equiv \Delta z;$$

тогда

$$t \equiv j \Delta t \equiv j \tau;$$

$$z \equiv i \Delta z \equiv i h;$$

где j, i — номера вертикальных и горизонтальных «нитей» сетки.

Каждый узел сетки — это пересечение горизонтальной и вертикальной нитей, поэтому номера нитей полностью определяют положение узла:

$$p(z, t) \equiv p_i^j;$$

$$p(z, t + \Delta t) \equiv p_i^{j+1};$$

$$p(z + \Delta z, t) \equiv p_{i+1}^j.$$

Верхний индекс — время, нижний — глубина от поверхности почвы. Нити сетки называют обычно *слоями*.

Запишем уравнения (2.1) и (2.2) в новых обозначениях

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &\approx \frac{W_{i+1}^{j+1} - W_i^j}{\tau}; \\ \frac{\partial q}{\partial z} &\approx \frac{q_{i+1}^j - q_i^j}{h}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Теперь можно записать уравнение водного баланса в виде

$$\frac{W_{i+1}^{j+1} - W_i^j}{\tau} = - \frac{q_{i+1}^j - q_i^j}{h}.$$

3. ПРОСТЕЙШАЯ ЯВНАЯ СХЕМА

Запишем расчетное дифференциальное уравнение (1.5) в конечных разностях.

Если брать шаги по времени и глубине достаточно малыми, то изменение коэффициентов расчетного уравнения на протяжении одного-двух шагов будет незначительно. Поэтому левую часть уравнения (1.5) можно записать так:

$$c(p) \frac{\partial p}{\partial t} \approx c_i^j \frac{p_{i+1}^{j+1} - p_i^j}{\tau}, \quad (2.4)$$

где

$$c_i^j = c(p_i^j).$$

Здесь и далее все коэффициенты расчетного уравнения берутся на предыдущем (по времени) слое сетки. Благодаря этому выражения для разностей *линейны* относительно значений потенциала на *последующем* слое сетки.

Фактически мы проводим линеаризацию для очень малого отрезка времени и пространства. Но в течение периодов, превышающих величину шага, коэффициенты уравнения меняются так, как это диктуют гидрофизические свойства почвы.

$$\frac{\partial k}{\partial z} \approx \frac{k_i^j - k_{i-1}^j}{h}, \quad (2.5)$$

где

$$k_i^j = k(p_i^j). \quad (2.6)$$

Чтобы вычислить величину первого члена правой части, найдем сначала в узле (i, j) величины:

$$\frac{\partial p}{\partial z} \approx \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h}; \quad (2.7)$$

$$k \frac{\partial p}{\partial z} \approx k_i^j \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h} . \quad (2.8)$$

Аналогично, в узле сетки $(i-1, j)$ величина

$$k \frac{\partial p}{\partial z} \approx k_{i-1}^j \frac{p_i^j - p_{i-1}^j}{h} . \quad (2.9)$$

Тогда

$$\frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial p}{\partial z} \approx \frac{1}{h} \left(k_i^j \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h} - k_{i-1}^j \frac{p_i^j - p_{i-1}^j}{h} \right) \quad (2.10)$$

как разность выражений в формулах (2.8) и (2.9), деленная на величину шага по глубине.

Приведем полностью расчетное уравнение (1.5) в разностном виде

$$c_i^j \frac{p_i^{j+1} - p_i^j}{\tau} = k_i^j \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h^2} - k_{i-1}^j \frac{p_i^j - p_{i-1}^j}{h^2} - \frac{k_i^j - k_{i-1}^j}{h} . \quad (2.11)$$

Теперь отчетливо видно, насколько громоздка индексная система. Тем не менее она широко применяется, потому что лучшей пока нет. Ниже мы покажем некоторые способы сокращенной записи, но программу для ЭВМ все равно приходится писать с помощью индексной символики.

Обратим внимание на то, что прогнозируемая величина давления в момент $j+1$ входит только в *левую* часть уравнения. Это позволяет переписать его в виде:

$$p_i^{j+1} - p_i^j = A^j; \quad (2.12)$$

или

$$p_i^{j+1} = p_i^j + A^j, \quad (2.13)$$

где

$$A^j = \omega \left[\frac{k_i^j}{c_i^j} (p_{i+1}^j - p_i^j) - \frac{k_{i-1}^j}{c_i^j} (p_i^j - p_{i-1}^j) + h (k_{i-1}^j - k_i^j) (c_i^j)^{-1} \right]; \quad (2.14)$$

$$\omega = \frac{\tau}{h^2} . \quad (2.15)$$

Уравнение (2.13) дает расчетную формулу для прогноза давления на один шаг по времени.

Теперь можно легко организовать процесс вычислений, например, для инфильтрации воды в почву, поверхность которой залита тонким слоем воды (напорная инфильтрация).

В исходный момент распределение давления задано начальным условием. Вычислив величину A^j , можно по формуле (2.13)

рассчитать давление в момент $t = \Delta t$, а затем повторить процесс вычислений для следующего шага по времени. Так шаг за шагом мы находим ход давления на всех глубинах, за весь интересующий нас период времени.

Разумеется, надо учитывать граничные условия. Поэтому в ходе описанного выше процесса расчета мы все время, на каждом шаге, будем вводить в вычисления давление на поверхности почвы (в нулевом по глубине узле). Такое же давление (равное примерно нулю) надо вводить в расчет в самом нижнем узле, соответствующем уровню грунтовых вод.

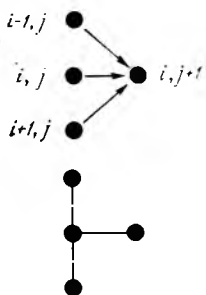


Рис. 3. Схематические изображения простейшей явной схемы

В заключение продемонстрируем еще одну сокращенную символическую форму записи. Как видно из расчетного уравнения, прогнозируемое давление зависит от значений в трех точках предыдущего слоя, соответствующих узлам $(j, i-1)$, (j, i) , $(j, i+1)$. Это можно изобразить графически (рис. 3).

Приведенная выше расчетная схема не единственно возможная, но она, по-видимому, самая простая. Это делает ее очень удобной и для анализа, и для составления простых (но не универсальных) коротких программ для ЭЦВМ.

4. УСТОЙЧИВОСТЬ

Таким образом, схема вычислений намечена. Можно подставлять числа и находить шаг за шагом распространение потенциала по глубине на каждый следующий момент времени. А зная потенциалы, легко с помощью зависимости (1.4) рассчитать влажности.

Теперь надо поручить ЭВМ весь этот процесс вычисления и посмотреть, что получится.

Пока мы рассчитываем медленно изменяющиеся процессы, все хорошо. Но стоит пройти сильному дождю, как ЭВМ начинает выдавать явно неверные результаты или просто останавливается из-за переполнения.

Неудачи чаще бывают при сильном дожде или испарении; чаще в песках, чем в глинах; чаще в слоистых грунтах, чем в более однородных; чаще при большей влажности, чем при меньшей. Наконец, при малых шагах по времени часто удается хоть что-то посчитать, а при больших — очень редко.

Описанная выше ситуация — это не исключение, а правило. Какую бы разностную схему мы ни выбрали, такие вещи всегда бывают. Вопрос только в том, как часто и какова величина этих «эффетов».

Чтобы уловить причину этих явлений, рассмотрим вначале самые простые случаи.

Равновесие

Пусть в начальный момент распределение влажности по глубине — равновесное, а в последующий период граничные условия остаются такими же, как при равновесном состоянии. Тогда

$$p = p_0 + z \quad (2.16)$$

во все последующие моменты времени.

Из формулы (2.16) следует, что

$$p_{i+1}^j - p_i^j = h, \quad (2.17)$$

и правая часть уравнения (2.11) равна нулю.

Таким образом, на каждом шаге по времени последующая величина будет равна предыдущей, т. е. все правильно.

Стационарное распределение

Точно таким же образом, как в предыдущем случае, можно показать, что расчетная разностная схема даст правильные результаты. Распределение давления по глубине будет описываться уравнением

$$k - k \frac{\partial p}{\partial z} = q_0 = \text{const}(t). \quad (2.18)$$

Существенно, что как в том, так и в другом случае правильные результаты получаются при как угодно большом шаге по времени. Можно предположить, что разностная схема плохо описывает нестационарные процессы.

Инфильтрация воды в почву

Это наиболее нестационарный из всех процессов влагопереноса в почвогрунтах.

Чтобы скорость изменения влажности была наибольшей, удобно выбрать случай инфильтрации в довольно сухой однородный грунт. Тогда распределение влажности по глубине будет почти ступенчатым: насыщенный грунт сверху и сухой снизу, разделенные узкой переходной зоной.

Пусть в начальный момент грунт был сухим, а затем на поверхность начала подаваться вода. Посмотрим, как будет описывать движение фронта промачивания наша разностная схема.

Из формулы (2.11) и особенно наглядно из диаграммы, приведенной на рис. 3, видно, что в расчетную формулу входит три величины давления в прошлом. Из них *только одна* соответствует точке, расположенной ближе к поверхности. Вторая лежит на той же глубине, а третья — ниже.

Следовательно, на каждом шаге по времени фронт промачи-

вания может продвинуться не более чем на один шаг по глубине. Лежащие ниже узлы «не почувствуют» еще, что к поверхности подана вода.

Иначе говоря, фронт промачивания будет двигаться все время с одинаковой скоростью, зависящей только от отношения шага по глубине к шагу по времени.

Но это неверно. Из опытов известно, что скорость распространения фронта может быть разной. Например, при постепенно усиливающейся интенсивности дождя скорость промачивания будет возрастать, а при заливе поверхности — все время убывать. При слабом дожде переменной интенсивности скорость промачивания будет то возрастать, то убывать.

Такую же картину дают и аналитические решения, *получаемые из расчетного дифференциального уравнения* (1.5) для частных случаев.

Следовательно, причина в том, что разностное уравнение в чем-то существенно отличается от дифференциального.

Это и понятно, так как переход от дифференциального уравнения к разностному — это приближение. Однако трудно было предполагать, что производя это «очевидное» приближение, мы получим расчетную схему, дающую *качественно* отличающиеся результаты.

Влияние величины шага

Посмотрим теперь, к чему приводит неправильное описание движения фронта промачивания.

Предположим, что мы взяли малый шаг по глубине. Тогда будет малой рассчитанная по разностной схеме скорость распространения фронта промачивания

$$V_p = \frac{h}{\tau}. \quad (2.19)$$

Поскольку в нашу модель входит уравнение сохранения массы, то вся впитавшаяся вода должна распределиться выше фронта промачивания. Если фронт промачивания идет медленней, чем поступает вода, то влажность (и давление) в промоченной зоне начнет катастрофически возрастать.

На самой поверхности почвы влажность не может увеличиться (там задано краевое условие), ниже фронта промачивания влажность фиксирована и равна начальной. Но зато в промоченной зоне образуется вздутие.

В действительности часто вместо одной выпуклости образуется несколько, т. е. что-то вроде волн.

Разумеется, это явление никак не связано с физикой процесса и обусловлено только самим методом расчета, тем, что мы выбрали малый шаг по глубине. Из-за этого расчетный фронт промачивания движется медленно, воде «некуда деваться» и образуются вздутия.

Ясно, что со временем влажность может стать как угодно большой. В таких случаях говорят, что разностная схема *неустойчива*.

Чтобы добиться устойчивости, надо вести расчет с меньшим шагом по времени или с большим — по глубине. Посмотрим, какую нужно выбрать пропорцию между ними, чтобы не было подобного рода явлений. Для этого надо знать, как в натуре движется фронт промачивания.

Если поверхность почвы залита тонким слоем воды, то движение фронта промачивания в *начальный период* довольно хорошо описывается формулой

$$z_0 = \varphi \sqrt{t}, \quad (2.20)$$

где z_0 — глубина промачивания; φ — некоторая константа, зависящая от свойств почвы и глубины слоя воды на поверхности.

Формула (2.20) подтверждена большим количеством опытов. Кроме того, ее можно вывести аналитически из математической модели, описанной в главе 1, а также из некоторых других теоретических моделей [9, 10, 28, 32, 49, 51, 65, 74, 90, 113].

Скорость движения фронта промачивания при расчете по формуле (2.12) не может быть больше, чем

$$V_p = \frac{h}{\tau},$$

и глубина фронта промачивания

$$z_{0p} = V_p \cdot t = \frac{h}{\tau} t. \quad (2.21)$$

Чтобы не было «переполнения» промоченной зоны, возмущение должно распространяться по узлам сетки быстрее, чем движется в натуре фронт промачивания, т. е.

$$z_{0p} > z_0;$$

или

$$\frac{h}{\tau} t > \varphi \sqrt{t};$$

$$\tau < \frac{h}{\varphi} \sqrt{t};$$

Это означает, что в начале процесса инфильтрации надо вести счет на ЭВМ с малым шагом по времени. Самым коротким должен быть первый шаг: от $t=0$ до $t=\tau$. Допустимую величину его можно найти, подставляя в последнюю формулу вместо t величину τ :

$$\tau < \frac{h}{\varphi} \sqrt{\tau};$$

или

$$\tau < \frac{h^2}{\varphi^2}. \quad (2.22)$$

Таким образом, если мы хотим вести расчет с *постоянным* шагом по времени, то надо выбрать его таким малым, чтобы выполнялось условие (2.22).

Этот вывод получен здесь сравнением простейшего аналитического решения с разностным. Как мы увидим далее, такое сравнение оказывается необходимым для разработки, анализа усовершенствования численных методов расчета на ЭВМ влад переноса.

Лимитирующая величина шага

Рассчитаем величину шага по формуле (2.22). Теория и опытные данные по инфильтрации воды в почву показывают, что величина

$$\Psi^2 = \frac{2 k_0 p_k}{ПВ - W_n},$$

где W_n — начальная влажность почвы.

В этой формуле более всего изменяется величина коэффициента фильтрации. Капиллярный напор p_k обычно не превышает 1 м вод. ст. при влажности, близкой к полевой влагоемкости. Принимая $ПВ - W_n = 0,25$ и $p_k = 1$ м, получим табл. 2 для определения максимального шага по времени (при шаге по глубине в 10 см).

Т а б л и ц а

Приближенные значения максимального шага по времени

Шаг	Песок				Супеси и суглинки				Глина	
	K_0 , см/с									
	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
$\tau_{\max}$, с	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
$\tau_{\max}$, сут	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3

Обычно исходные данные о метеоусловиях и уровне грунтовых вод — это суточные величины. Для большинства прикладных расчетов также достаточно иметь результаты наблюдений или вычислений с шагом по времени 1—10 сут.

Между тем, чисто математические затруднения заставляют нас вести расчет с гораздо меньшим шагом. За счет этого сильно увеличивается необходимое машинное время. Как видно из табл. 2, достаточно иметь в почве тонкий слой с высокой проницаемостью, чтобы возникла необходимость увеличить затраты машинного времени в миллион раз.

Этого можно избежать, назначив очень большой шаг глубины. Но тогда резко возрастут погрешности расчета. Кроме того придется вводить в программу специальную операцию (процедуру) интерполирования результатов расчета, чтобы найти значения влажности на сетке наблюдений.

Другой способ — использование сетки с переменным шагом. При глубоком залегании грунтовых вод можно использовать шаг по глубине, возрастающий сверху вниз примерно пропорционально квадрату глубины. Но вблизи уровня грунтовых вод шаг сетки снова должен стать меньше.

На первых этапах моделирования напорной инфильтрации на ЭВМ часто использовался переменный шаг по времени, возрастающий пропорционально корню квадратному от времени. Как показывают формулы предыдущего раздела, это имеет некоторый смысл при резкой нестационарности в начале процесса.

В общем случае естественно меняющихся метеорологических и гидрогеологических условий схемы с переменными величинами ячеек применяется пока мало. Систематическое применение их нецелесообразно, если мы не знаем *заранее*, до расчета, величину оптимальных шагов по времени и глубине.

В некоторых расчетах применялся способ, основанный на идее обратной связи. Вначале расчет проводился на довольно крупный шаг по времени вперед. Если результат оказывался в определенном смысле «странным», производился пересчет с меньшим шагом. Проверка на «странность» производилась с помощью специальных критериев на каждом шаге.

В последнее время, в связи с расчетами ударных волн и некоторых аналогичных задач механики, интенсивно развивается теория и техника расчета на неравномерных сетках. Надо ожидать, что со временем, когда более мощные ЭВМ станут общедоступными, эта техника будет широко применяться и в прикладных расчетах влагопереноса в почве.

Существуют и некоторые другие приемы, позволяющие обойти ограничения на величину шага по времени. Однако любое из них связано так или иначе с резким усложнением программы расчета. Это нежелательно, потому что память доступной ЭВМ, может быть слишком мала. Возрастает также возможность появления ошибок, опечаток и других «помех» в самой программе.

К сожалению, пока нет способа расчета, обходящего это ограничение, и вместе с тем такого же простого, как описанная выше схема.

Влияние гравитации

Уравнение (2.20) хорошо описывает процесс инфильтрации только в самом его начале. Более общее уравнение имеет вид [9, 10, 28, 32, 49, 51, 65, 74, 90, 113].

$$z_0 = \varphi \sqrt{t} + \chi t. \quad (2.23)$$

Сравнение уравнений (2.21) и (2.23) дает

$$\frac{h}{\tau} t > \varphi \sqrt{t} + \chi t. \quad (2.24)$$

Если мы по-прежнему будем считать лимитирующим первый шаг по времени, то получим условие устойчивости

$$h > \varphi \sqrt{\tau} + \chi \tau. \quad (2.25)$$

Мы видим, что шаг по времени должен быть еще меньше чем диктуемый формулой (2.22), так как

$$\tau < \frac{h^2}{(\varphi + \chi \tau)^2}. \quad (2.26)$$

Кроме того, из формулы (2.24) следует, что при переменном шаге по времени закон его изменения должен быть более сложным:

$$\tau < \frac{h t}{\varphi \sqrt{t} + \chi t} = \frac{h \sqrt{t}}{\varphi + \chi \sqrt{t}}. \quad (2.27)$$

Физически это довольно очевидно. Если происходит впитывание в горизонтальную колонку почвы, то в формуле (2.23) остается только первый член (второй учитывает действие гравитации). Естественно, что при дополнительном действии сил тяжести фронт распространяется быстрее, и шаги по времени приходится брать меньше.

Условия на поверхности почвы

При значительных давлениях на поверхности почвы [9, 10, 28]

$$\varphi^2 \approx \frac{k_0 (\rho_k + \rho_n)}{ПВ - W_n}. \quad (2.28)$$

Слой воды толщиной ρ_n на поверхности почвы может быть сравнимым с ρ_k при лиманном орошении, инфильтрации из каналов и других реально существующих ситуациях. Даже в естественных условиях нечто подобное может наблюдаться при инфильтрации верховодки в относительный водоупор.

Таким образом, величина φ зависит не только от гидрофизических свойств почвы, но и от начальных и граничных условий. Это естественно, так как с увеличением давления ρ_n на поверхности почвы фронт промачивания движется быстрее.

Отметим, что если величина давления на поверхности почвы увеличивается достаточно быстро и сильно, то скорость промачивания может не уменьшаться, а *увеличиваться* со временем. Тогда лимитирующим будет уже не первый, а последний шаг, и расчет выгоднее всего вести с постоянно уменьшающимся шагом по времени.

Высокая влажность почвы

До сих пор мы рассматривали поведение всей промоченной зоны «в целом», пользуясь понятием фронта промачивания, которое довольно условно.

Еще лет тридцать назад среди специалистов по терминологии возникал спор о том, как определить это понятие, или «существует ли фронт промачивания».

При инфильтрации воды в сухую почву промоченная зона значительно более темная и граница ее четко прослеживается простым глазом. Но это не означает, что в светлую, более сухую почву не попала вода. Напротив, непосредственные точные измерения обнаруживают, что некоторое (хотя и весьма малое) количество воды уже проникло в сухую зону. Как показывают датчики *температуры*, эта вода пришла в виде пара, путем диффузии через занятые воздухом поры; как известно, возмущение при таком механизме переноса распространяется примерно со скоростью звука.

Таким образом, распространение видимого фронта промачивания — это движение зоны довольно быстрого изменения влажности. В мокром глинистом грунте эта зона может быть сильно растянута. Тогда определение фронта становится весьма условным, тем более что оптические свойства здесь изменяются слабо и наглядность понятия явно теряется.

В такой ситуации разумно определить движение фронта промачивания как перемещение некоторой влажности. Какую именно «критическую» влажность выбрать, это неважно.

Существенно следующее. При напорной инфильтрации в горизонтальную колонку почвы чем меньше влажность, тем быстрее она распространяется. В вертикальной колонке в начале процесса все идет так же, но со временем скорости движения разных влажностей постепенно уравниваются [28].

Мы рассматривали случаи, когда давление на поверхности почвы все время постоянно. Если же оно в середине процесса резко увеличится, то какое-то время большие влажности будут распространяться быстрее, чем малые. В результате образуется более резкий фронт промачивания. Аналогичная картина наблюдается также при резком увеличении интенсивности морозящего дождя (безнапорная инфильтрация).

Во всех случаях в некоторой *части* промоченной зоны расчет даст «переполнение». Причина в том, что *некоторые* влажности распространяются очень быстро, быстрее чем вся зона в целом.

Таким образом, «переполнение» может начаться на очень небольшом участке, но потом оно неизбежно распространится, потому что значения в каждом узле сетки вычисляются с помощью соседних.

Поскольку влажность в нашей модели есть функция давления (см. главу I), то можно говорить о распространении влажностей и давлений.

Теперь вполне естественно вспомнить об одном понятии, которое довольно широко применялось в гидрологии почв лет пятьдесят назад, но сейчас почти полностью забыто. А. Ф. Лебедев [46] очень любил писать о *передаче давления* в почвенной влаге. С этой точки зрения инфильтрацию можно рассматривать как передачу давления от источника воды в толщу почвы. Разные величины давления распространяются с разной скоростью.

В простейших случаях инфильтрации давления, соответствующие меньшим влажностям, распространяются скорее.

Естественно, что скорость передачи давлений не должна быть больше, чем передача возмущения в разностной схеме. Иначе будут наблюдаться «переполнение» и неустойчивость.

Посмотрим теперь, что получится, если влажность в некоторой части промоченной зоны станет равной полной влагоемкости.

Влажность насыщенной почвы с увеличением давления практически не меняется. Но если принять, что

$$c \equiv \frac{dW}{dp} = 0 \text{ при } p \geq 0,$$

то входящая в правую часть расчетной формулы (2.13) величина c^{-1} станет равной бесконечности, и нельзя будет вести расчет.

Физически вода и скелет сжимаемы. Можно учесть это, тогда

$$c \equiv \frac{dW}{dp} \approx 10^{-5} \text{ атм}^{-1} \approx 10^{-10} \text{ Па}^{-1}.$$

Но зато в правой части расчетной формулы (2.13) появится громадный множитель, равный 10^6 м вод. ст. ($\approx 10^{10}$ Па) и естественно, с каждым шагом давление начнет катастрофически быстро изменяться.

Это объясняется просто. В полностью насыщенной почве давление распространяется мгновенно. Достаточно, чтобы изменились условия на торцах колонки, как сразу установится новое распределение давления. Независимо от того, что было в прошлом, это распределение будет оставаться таким же до тех пор, пока не изменятся краевые условия.

Физически распространение давлений не может происходить мгновенно. Первое ограничение — скорость звука. Второе — некоторая небольшая пьезоёмкость почвы, которую мы учли, положив $c \approx 10^{-5} \text{ атм}^{-1} \approx 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. Но все равно (и это физически очевидно) скорость передачи давлений остается очень большой. И поскольку она больше скорости передачи возмущений в разностной схеме, то неизбежна неустойчивость.

Можно сказать, что разностная схема дает неверные результаты потому, что мы пытаемся вычислить распределение давлений в насыщенной почве в заданный момент по значениям давления в прошлом, в предыдущий момент времени.

Ведь все исходные величины, входящие в расчетную формулу (2.13), взяты на предыдущем слое сетки. Этого нельзя делать потому что в данном случае давление не зависит от прошлого и определяется только граничными условиями. Такая точка зрения *конструктивна*.

Например, можно просто во всех случаях, когда влажность близка к полной влагоемкости, рассчитывать давление как для чисто насыщенного течения, принимая влагопроводность равной

коэффициенту фильтрации. Во всяком случае ошибка будет меньше.

Еще разумнее было бы сконструировать некоторую «комбинированную» разностную схему, которая для узлов, где достигается насыщение, превращалась бы в нечто похожее на уравнение насыщенной фильтрации и не учитывала бы предысторию. Или, во всяком случае, слабо учитывала бы прошлое (см. следующую раздел).

Итак, простейшая явная разностная схема не годится для создания *универсального* алгоритма и программы прикладных расчетов на ЭЦВМ влажности почвы. Основной ее недостаток не в том, что она требует очень малых шагов по времени (как это указано во многих монографиях по теории разностных схем и гидрологии почв), а в том, что она *совершенно не может работать*, если в некоторой части профиля почвы достигнуто насыщение.

Для чего автор столь подробно ее описывал, а читатель тратит время на чтение, казалось бы, бесполезного материала?

Дело в том что пока ничего принципиально лучшего нет. Все операции с конечными разностями сводятся к тому, что в эту же схему вносятся некоторые поправки. Они не сглаживают полностью все те «острые углы», с которыми мы здесь сталкиваемся.

Делается это ценой некоторых усложнений, поэтому все такие «подводные камни» видны довольно плохо. Но рано или поздно они обнаруживаются.

5. НЕЯВНАЯ РАЗНОСТНАЯ СХЕМА

Как было показано выше, основной недостаток простейшей явной разностной схемы заключается в том, что она не работает при полном насыщении. Как только коэффициент c_i^j в формуле (2.11) становится равным нулю, мы уже не можем «прогнозировать» давление (или влажность) на шаг вперед. Величина A^j в прогностической формуле (2.13) становится равной бесконечности.

Естественно преобразовать формулу (2.11) таким образом, чтобы прогнозируемая величина давления входила в нее не только умноженной на коэффициент c_i^j , но и на что-нибудь еще. Тогда мы сохраним возможность считать шаг за шагом, даже если этот коэффициент будет равен нулю.

Гроше всего это сделать, вычисляя производные по глубине не в момент j , а в слое $(j+1)$. Тогда разностная схема будет иметь вид

$$c_i^j \frac{p_i^{j+1} - p_i^j}{\tau} = k_i^j \frac{p_{i+1}^{j+1} - p_i^{j+1}}{h^2} - k_{i-1}^j \frac{p_i^{j+1} - p_{i-1}^{j+1}}{h^2} - \frac{k_i^j - k_{i-1}^j}{h} \quad (2.29)$$

Измененные по сравнению с (2.11) индексы выделены жирным шрифтом.

Следует обратить внимание на то, что в правой части уравнения (2.29) мы изменили индексы у всех величин давления. Ни индексы у коэффициентов мы не трогали. Коэффициенты по-прежнему вычисляются на *предыдущем* временном слое. Делается это для того, чтобы система уравнений (2.29) была *линейной* относительно прогнозируемых (неизвестных) величин давления. Тогда ее легче будет решать.

Теперь ничто не мешает нам двигаться вперед шаг за шагом. Если даже наступит полное насыщение, в правой части уравнения (2.29) сохраняется вполне достаточно величин с индексом $j+1$, которые можно вычислить. Но сделать это не так просто. Раньше в разностную схему входила только одна величина с индексом $j+1$ (в левой части уравнения). В результате мы получали сразу расчетную формулу (2.13) для прогнозирования давления на шаг вперед.

Теперь у нас величин с индексом $j+1$ несколько, у них *разные нижние индексы*, и поэтому получить *явную* расчетную формулу типа (2.13) уже трудно. Поэтому подобного рода разностные схемы называются *неявными*.

Вместо расчетной формулы мы имеем расчетные уравнения. Эту систему уравнений надо решать. Программа для ЭВМ станет сложнее и длиннее, количество вычислений увеличится, а значит необходимы будут большие быстродействие и память ЭВМ.

Однако все это хотя и плохо, но система уравнений линейна. Это упрощает дело.

Обратим теперь внимание на следующее. Раз схема работает при насыщении почвы водой, когда давления передаются практически мгновенно, значит, не должно быть никаких неожиданностей с «переполнением». Можно сказать, что разностная схема «абсолютно устойчива». В вычислительной математике эту схему называют «абсолютно устойчивой». На самом деле нам просто удалось сгладить один из видов неустойчивости. Теперь можно проводить вычисления с несколько большим шагом по времени, и вероятность того, что будут получаться явно неверные результаты стала несколько меньше. Но ни о какой «абсолютной» устойчивости не может быть и речи.

Расчетная система уравнений

Формула (2.29) описывает систему линейных алгебраических уравнений, которую надо решить. Вычисляемые («спрогнозированные» на один шаг по времени) величины имеют верхний индекс $j+1$. Некоторые из них встречаются в уравнении (2.29) дважды или трижды.

Естественно привести эту систему уравнений к форме, принятой в алгебре:

$$A_i p_{i-1}^{j+1} - C_i p_i^{j+1} + B_i p_{i+1}^{j+1} = -F_i, \quad (2.30a)$$

120

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{k_{i-1}^j}{h^2}; \\ C_i &= \frac{\sigma_i^j}{\tau} + \frac{k_i^j + k_{i-1}^j}{h^2}; \\ B_i &= \frac{k_i^j}{h^2}; \\ F_i &= \frac{c_i^j}{\tau} + \frac{k_i^j - k_{i-1}^j}{h}. \end{aligned}$$

Запись уравнения все еще остается довольно громоздкой. Чтобы немного упростить ее, условимся «подразумевать» верхний индекс у величин давления всегда равным $j+1$ и пока не будем писать его. Тогда вместо (2.30а) получим

$$\begin{aligned} A_i p_{i-1} - C_i p_i + B_i p_{i+1} &= -F_i; \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (2.306)$$

Теперь более отчетливо видно, что это *система* уравнений. Вот полная запись ее:

[illegible]

Все коэффициенты выражаются через давления на предыдущем слое по времени и поэтому *известны*.

Расстояние от поверхности почвы до уровня грунтовых вод мы разобьем на отрезки длиной h с помощью $N+1$ узлов. Нулевой узел — на поверхности почвы, узел с номером N — на уровне грунтовых вод.

Давление в узле N известно: оно равно нулю

$$p_N^{j+1} = 0. \quad (2.31)$$

На поверхности почвы краевое условие задано обычно в виде потока влаги (см. главу 1). Поэтому

$$q_0 = -k_0^j \frac{p_1^{j+1} - p_0^{j+1}}{h} + k_0^j = f_1(t);$$

19511

$$a_0 p_0^{j+1} - c_0 p_1^{j+1} = -F_0, \quad (2.32)$$

где

$$a_0 = c_0 = \frac{k_0^j}{h};$$

$$F_0 = k_0^j - f_1(t).$$

Запись верхнего граничного условия в виде (2.32) удобна тем, что она формально сохраняет свой вид и тогда, когда на поверхности почвы задан не поток влаги, а значение давления. В этом случае

$$a_0 = 1;$$

$$c_0 = 0;$$

$$F_0 = -p_{z=0}.$$

Итак, формулы (2.30в) — это $(N-1)$ уравнения, формулы (2.31) и (2.32) — еще два уравнения; всего $(N+1)$ линейных уравнения с $(N+1)$ неизвестными величинами $p_0, p_1, p_2, \dots, p_N$.

«Прогонка»

Существуют стандартные методы решения линейных алгебраических уравнений, например с помощью определителей, и их вполне можно было бы применить. Но это не лучший вариант.

Определитель представляет собой таблицу из N столбцов, в каждом из которых N чисел. Чтобы произвести одно какое-нибудь арифметическое действие с таким определителем, надо как минимум один раз что-нибудь сделать с каждым числом. Поэтому общее количество арифметических операций

$$K_{\text{общ}} = AN^2,$$

причем A всегда больше единицы.

Если бы в каждое уравнение входили давления только на *двух* глубинах, то мы могли бы применить обычный метод исключения. Ведь нижнее граничное условие дает нам значение давления на УГВ. Тогда с помощью «нижнего» разностного уравнения можно было бы вычислить, что делается в следующей точке. Затем двигаться дальше снизу вверх таким же образом, пока не переберем все узлы. Тогда количество вычислений будет пропорционально числу разностных уравнений, т. е.

$$K_{\text{общ}} = AN.$$

К сожалению, этого сделать нельзя, так как в каждое уравнение системы (2.30в) входит *три* неизвестные величины. Но зато есть два краевых условия: сверху и снизу.

Поэтому поступим так. Вначале пойдем сверху вниз. В уравнении (2.32) у нас *только две неизвестные величины*. Используя это, можно из первого уравнения системы (2.30в) исключить одно из неизвестных. Тогда в нем останется *две* неизвестные

величины. Переходя сверху вниз от одного уравнения к другому, мы получим систему уравнений, в каждое из которых входит *две* неизвестные величины.

А теперь можно решить эту систему методом исключения, идя «снизу вверх», от известного нижнего граничного условия.

Таким образом, мы как бы «прогоняем» числа: сначала в глубину почвы, до грунтовых вод, а затем обратно. Поэтому метод решения расчетной системы уравнений и называется «*прогонкой*».

Если бы при каждом переходе от уравнения к уравнению надо было сделать всего одну арифметическую операцию, то общее их количество было бы равно $2N$. На самом деле их больше, но

$$K_{\text{общ}} \approx 2AN.$$

Чтобы обеспечить удовлетворительную точность расчета на ЭВМ водного режима почвы, обычно берут около 100 узлов по глубине. Оказывается, что при вычислении «в общем виде» количество операций $\approx 10^4 A$, а методом прогонки — около $10^2 A$. Таким образом, прогонка позволяет производить вычисления примерно в 100 раз быстрее.

Важно отметить, что если бы не изобрели прогонку, то прикладные расчеты водного режима почв на общедоступных ЭЦВМ были бы сейчас практически невозможны.

Передача давления

Расчет давления методом прогонки сводится, вообще говоря, к ряду последовательных вычислений по формуле

$$p_i = \alpha_i p_{i+1} + \beta_i. \quad (2.33)$$

Первое значение давления мы берем из нижнего граничного условия и затем, шаг за шагом, вычисляем давления во всех узлах.

Физический смысл этой операции (*прогонки снизу вверх*) заключается в том, что мы, шаг за шагом, рассчитываем, как распространяется в почве влияние нижнего краевого условия.

Прогонка сверху вниз, в ходе которой мы вычисляем коэффициенты α_i и β_i , позволяет нам учесть влияние верхнего краевого условия на водный режим всех расчетных точек профиля.

Таким образом, в отличие от явной схемы, здесь возмущение распространяется сразу же. Например, при инфильтрации сразу на всех глубинах начинается увеличение влажности. Целая прогонка, мы «сообщаем» всем узлам, что давление на поверхности изменилось.

Поэтому здесь не появляется парадоксов с «переполнением» при сильно неустановившемся режиме. Мы можем вести расчет с большим шагом по времени и получать кое-какие результаты. Но могут появиться и другие виды неустойчивости.

Обратим внимание, например, на то, что если в формуле (2.33) коэффициент $\alpha_i > 2$, то, проведя 100 вычислений, мы получим огромное число равное 2^{100} .

Мы видим, что если давление передается «с усилением», метод расчета может оказаться совершенно неустойчивым.

Кроме того, если $\alpha_i = 0$, то давление вообще не передается мы получим то же, что имели в явной схеме. Значит необходимо чтобы

$$0 < \alpha_i < 1. \quad (2.34)$$

Это не очевидно, и надо еще доказать, что α_i лежат в этих пределах.

Как мы увидим дальше, формулы прогонки имеют такой вид что неравенство (2.34) почти всегда выполняется. Но могут быть случаи, когда $\alpha_i = 1$.

Расчет ведется приближенно и вследствие, например, ошибки округления чисел может случиться, что коэффициент станет чуть больше единицы. Это — плохо.

Расчет коэффициентов α_i и β_i в формуле (2.33) производится при прогонке сверху вниз. Красное условие (2.32) сразу дает нам формулы

$$\alpha_0 = + \frac{c_0}{a_0};$$

$$\beta_0 = - \frac{F_0}{a_0}.$$

Если на поверхности почвы задан поток влаги, то

$$\alpha_0 = 1;$$

$$\beta_0 = \left(\frac{f_1^{j+1}}{k_0^j} - 1 \right) h.$$

Из уравнения (2.30а) путем несложных, но довольно громоздких преобразований можно получить формулы для дальнейших расчетов

$$\alpha_i = \frac{k_i}{(1 - \alpha_{i-1}) k_{i-1} + k_i + \omega c_i}; \quad (2.35)$$

$$\beta_i = \frac{\beta_{i-1} k_{i-1} + \omega c_i \varphi_i - h (k_i - k_{i-1})}{(1 - \alpha_{i-1}) k_{i-1} + k_i + \omega c_i}; \quad (2.36)$$

где

$$\varphi_i = \rho_i^j;$$

$$\omega = \frac{h^2}{\tau}.$$

Из уравнения (2.35) видно, что при полном насыщении величины α_i будут равны единице, так как $c_i = 0$.

При очень больших шагах по времени величина ω становится малой. Это тоже может способствовать приближению к истинной грани.

Простейший выход заключается в том, чтобы всегда вводить в расчет достаточно большие значения c_i и вести счет более мелкими шагами по времени при высокой влажности почвы. Имеется и ряд других приемов, однако большая часть их неприемлема, потому что сильно усложняет вычисления.

6. ПРОБЛЕМА ТОЧНОСТИ

В предыдущем разделе показано, что при $\alpha_i = 1$ возникает возможность качественного изменения результатов вычислений.

Но даже если качественно решение не изменилось, вероятность появления больших количественных погрешностей становится довольно большой уже при $\alpha_i = 1$.

При вычислении по формуле (2.33) неизбежно возникающие погрешности на каждом шаге уменьшаются в α раз. Если α близко к единице, то такого уменьшения не происходит. В результате ошибки в вычислениях накапливаются при переходе снизу вверх от одного узла к другому.

Погрешности расчета могут возникать просто вследствие того, что вычисления на ЭВМ ведутся с конечным количеством десятичных знаков и результаты любой арифметической операции округляются. Но эти ошибки невелики и обычно соответствуют тем, которые получаются при действии семизначными десятичными числами. Тем не менее, при 100 узлах по глубине и примерно десяти арифметических операциях в каждом узле мы можем иметь расхождение в четвертой и даже третьей значащей цифре.

Это наглядно видно при проведении параллельных расчетов на ЭВМ разных типов. Значения влажности (в долях единицы) в четвертом, а иногда и в третьем знаке после запятой получаются разными, даже если все исходные данные идентичны.

Но для инженерных расчетов эти погрешности не существенны. Более серьезные источники ошибок — это сами исходные данные, которые обычно в прикладных расчетах имеют точность, не превышающую 1%. Если эти погрешности начнут складываться, то в результате последовательного расчета давлений в 100 узлах мы получим ошибку, соизмеримую с рассчитываемой величиной.

На каждом шаге мы вводим в расчет значения гидрофизических характеристик почвы. Они сами по себе не могут быть точными, да еще определяются на предыдущем временном слое. Это, по-видимому, основной источник возможных погрешностей.

Таким образом, приближение величины α к единице нежелательно. Отметим, что формулу (2.35) можно переписать в виде

$$\alpha_i = \frac{1}{(1 - \alpha_{i-1}) \frac{k_{i-1}}{k_i} + 1 + \frac{\omega c_i}{k_i}}$$

Если все значения α близки к единице, то

$$\alpha_i \leq \frac{1}{1 + \frac{\omega c_i}{k_i}};$$

откуда ясно видно, что точность определяется неравенством

$$\frac{\omega c_i}{k_i} = \frac{h^2}{\tau} \cdot \frac{c_i}{k_i} \gg 0.$$

Получается, что величина шага по глубине должна быть достаточно большой, или же шаг по времени надо взять достаточно малым.

Почти такой же результат мы имели и для простейшей *явной* схемы. Здесь это ограничение не приводит к качественным эффектам, а просто вызывает увеличение погрешности расчета,

Явные и неявные схемы

Напомним, что неявная схема расчета не является чем-то принципиально отличным от явной. Мы просто ввели небольшую поправку, вычислить в разностном эквиваленте исходного дифференциального уравнения производные по глубине на *последующем* (а не на предыдущем) временном слое.

Само название «неявная схема» тоже не вполне оправдано. Любая неявная схема дает систему уравнений, чаще всего линейных. В принципе эти алгебраические уравнения можно решить и записать *явную* формулу для вычисления решения, например, с помощью определителей. Но сам процесс вычислений от этого не упрощается, а становится более громоздким.

Однако название явные и неявные схемы стало общепринятым.

Иногда неявную схему, описанную выше, называют схемой с опережением: производные по глубине вычисляются как бы наперед (во времени). Но и это несущественно. Известны схемы с опережением, которые неустойчивы и при как угодно малых временных шагах [11, 19, 75—79, 92, 104].

Существенны только скорость и степень передачи информации о начальных и граничных условиях от узла к узлу. Описанная выше неявная схема хороша тем, что не имеет противоречащих физике процесса ограничений на *скорость* передачи информации. Но она по-прежнему имеет ограничения на *степень* передачи информации.

«Экономичные» разностные схемы строятся так, чтобы удобно и быстро проводить вычисления. При этом нарушаются неко-

которые основные физические принципы, заложенные в исходной теории, и расчет дает «странные» результаты.

Можно предложить ряд разностных схем, которые лучше учитывают степень передачи информации, чем описанные выше. Но применять их в прикладных расчетах влагопереноса пока нецелесообразно, потому что они гораздо сложнее и требуют большего числа вычислений.

Оценка точности

Если ошибки неизбежны, надо знать, какова их величина.

Хорошо было бы иметь общую теорию, позволяющую предсказать, что данная разностная схема при заданной сетке даст ошибки, не превосходящие определенной величины. Тогда сразу отпала бы необходимость исследования разных типов неустойчивости.

Но даже при идеально устойчивой схеме желательно иметь для инженерных расчетов если не абсолютную, то хотя бы вероятностную оценку, например среднеквадратическое отклонение приближенных значений от точных.

К сожалению, пока такой теории нет. Имеются незначительные разработки подобного рода для *линейных* моделей, но даже в этом простейшем случае они дают весьма завышенные величины оценок.

Для *нелинейных* моделей оценка ошибки настолько завышена, что практически бесполезна. Например, имеется ряд исследований, смысл которых (в терминах гидрологии почв) заключается в том, что ошибка расчета влажности не превышает величины полной влагоемкости. Даже такие оценки позволяют по крайней мере обеспечить устойчивость разностной схемы.

Эмпирические оценки

Где теория не может дать ответа, неизбежно начинают применять некоторые эмпирические приемы.

Для оценки точности, которую дают разностные методы расчета влагопереноса, обычно применяются следующие три приема.

Во-первых, качественная оценка результатов расчета на правдоподобие с точки зрения физики процесса. Для этого, производят побольше расчетов при различных метеоусловиях и почвах, оформляют их в виде графиков и смотрят, нет ли чего «странного». Фактически здесь используются некоторые интуитивные понятия о возможном и невозможном.

Во-вторых, проводят большое количество сравнений с опытом и наблюдениями. При этом стараются как-то отсеять погрешности, обусловленные неточностью опытных данных. Обычно первый и второй приемы применяют одновременно. Вначале

всегда рассчитывают случаи, соответствующие опытным данным, а потом пробуют считать экстремальные ситуации.

В-третьих, проводят сопоставление с известными или специально полученными аналитическими решениями. Это единственная возможность оценить *количественно* расхождение между решением дифференциального и разностного уравнения. Желательно вести такие сопоставления с помощью возможно большего количества разнообразных аналитических решений.

Естественно, что ценность такого эмпирического анализа тем выше, чем больше численных опытов и сравнений было проведено. Главным преимуществом алгоритмов и программ [45, 53, 63, 64, 69] как раз и является то, что с помощью их было проведено очень много расчетов и сравнений.

7. СЛОИСТОСТЬ ПОЧВЫ

В представлении почвоведов почва напоминает слоеный пирог. Существует целая наука о том, как выделять, называть и обозначать каждый из слоев. Обычно их называют *горизонтами*, каждый из которых имеет некоторую *мощность* (толщину).

В шурфах иногда прослеживается довольно резкая визуальная граница между горизонтами. Все это породило представление о том, что изменение свойств почвы с глубиной может происходить скачкообразно.

На начальном, качественном этапе развития почвоведения эти представления играли важную роль в понимании истории происхождения (*генезиса*) разных почв.

Идея генетических горизонтов должна правильно использоваться при расчете водного режима почв. Несомненно, что во многих случаях гидрофизические характеристики сильнее меняются от слоя к слою, чем внутри их. Кроме того, внутри слоев водные свойства почв часто изменяются *монотонно*, т. е. все время возрастают или убывают. Например, коэффициент фильтрации и плотность сухой почвы обычно уменьшаются с глубиной.

Это позволяет резко уменьшить количество проб, отбираемых для определения свойств почвы. Минимум — это одна проба из каждого слоя. Лучше иметь три пробы: сверху, посередине и у подошвы каждого слоя.

Если на данной территории производилась почвенная съемка, то для каждой скважины будут приведены мощности генетических горизонтов. Но в этих материалах, вероятно, не удастся найти сведений о влагопроводности и ОГХ почвы.

Разумный способ использования такого рода информации заключается в том, чтобы по определениям гидрофизических характеристик отдельных слоев в каком-либо одном месте реконструировать изменение их по глубине в других. Для этого и надо использовать данные о мощности генетических горизонтов,

которая может быть весьма различна даже в очень близких пунктах.

Во многих случаях внутри генетических горизонтов приходится выделять несколько дополнительных, учитывая реальное изменение измеренных физических свойств почвы.

Не следует представлять себе границы между генетическими горизонтами в виде идеальных плоскостей. Обычно существует некоторый переходный слой. Даже если он очень тонок, то все равно глубина расположения его сильно изменяется даже на небольших участках; граница имеет обычно формулу более или менее развитых «языков».

Условие на стыке слоев

В задачах о фильтрации поперек *насыщенного* слоистого грунта используется обычно «склеивание» с помощью следующих формул

$$\overset{\downarrow}{p}_{-0} = \overset{\downarrow}{p}_{+0}; \quad (2.37)$$

$$\overset{\downarrow}{k} - \overset{\downarrow}{k} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{-0} = \overset{\downarrow}{k} - \overset{\downarrow}{k} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{+0}. \quad (2.38)$$

Стрелка вверх или вниз показывает, для какого слоя берется физическая характеристика почвы.

В начале исследований по расчету влагопереноса на ЭВМ эти же условия механически использовались и для ненасыщенной почвы.

При расчетах методом конечных разностей сетка выбиралась так, чтобы узел m был закреплен на стыке генетических горизонтов. В соответствии с условием (2.37) давление изменяется непрерывно и может быть вычислено в этом узле. Равенство потоков влаги, предполагаемое уравнением (2.38), можно выразить следующим образом

$$\overset{\downarrow}{k}_{m-1} \frac{p_m^{j+1} - p_{m-1}^{j+1}}{h} - \overset{\downarrow}{k}_{m-1} = \overset{\downarrow}{k}_m \frac{p_{m+1}^j - p_m^{j+1}}{h} - \overset{\downarrow}{k}_m. \quad (2.39)$$

Это уравнение появилось впервые в одной из американских работ, и его применяли, не задумываясь. В программах «Гидрофизика 72—74» [53, 69] также «по инерции» использовалось это краевое условие.

Однако физически оно верно только для *насыщенной* фильтрации. Это легко обнаружить, если принять, что свойства стыкующихся слоев одинаковы. Тогда

$$\overset{\downarrow}{k}_i^j = \overset{\downarrow}{k}_i^j,$$

и уравнение (2.39) имеет вид

$$k_{m-1}^j \frac{p_m^{j+1} - p_{m-1}^{j+1}}{h} - k_m^j \frac{p_{m+1}^{j+1} - p_m^{j+1}}{h} + k_m^j - k_{m-1}^j = 0. \quad (2.40)$$

Но сравнение с разностной схемой (2.29) показывает, что на самом деле левая часть уравнения (2.40) должна равняться не нулю, а величине

$$c_i^j \frac{p_m^{j+1} - p_m^j}{\tau} h. \quad (2.41)$$

Поэтому естественно, что в правую часть уравнения (2.40) придется поставить вместо нуля величину (2.41).

Однако это создает новые трудности. Хотя в точке сопряжения слоев величина давления непрерывна, значение влажности делает скачок; при использовании условия (2.40) эта трудность несущественна, потому что влажность не входит в расчетное уравнение. После вычисления давления во всех узлах можно найти влажность на стыке по одной из двух зависимостей.

При вычислении величины c_i^j , входящей в расчетное уравнение для давления, аналогичная трудность является существенной.

Учитывая, что переходный слой физически должен иметь определенные размеры, представляется разумным вычислять

$$W_m^{j+1} = 0,5(W_m^{j+1} + W_m^{j+1});$$

$$c_m^{j+1} = 0,5(c_m^{j+1} + c_m^{j+1}).$$

Схема сквозного счета

Условие на стыке слоев порождает и другие чисто технические трудности. Вводится специальное уравнение, отличающееся от формулы, диктуемой разностной схемой. Это нарушает единообразие вычислений и усложняет программу расчета. В частности, приходится применять специальные формулы для вычисления коэффициентов прогонки на границах генетических горизонтов. Этого лучше избежать, в особенности когда слоев много.

Всегда можно расположить узлы сетки так, чтобы границы слоев оказались между узлами. Это проще всего сделать, несколько изменив задаваемую мощность горизонтов. Например, глубину стыка, равную 50 см, записывают как 50,001 см. При любом реально используемом шаге можно быть уверенным, что ни один узел не попадает в точку склеивания.

Теперь, в принципе, можно проводить вычисления для всех узлов по одним и тем же формулам обычной неявной схемы («сквозной счет»).

В окрестности точки сопряжения, конечно, допускается не-

которая дополнительная ошибка. Ведь вместо аккуратно осредненных коэффициентов мы применяем взятые из соседних узлов. Чтобы избежать этого, часто применяются *осредненные* по двум или трем узлам гидрофизические характеристики. Это как будто повышает точность вычислений и в других узлах сетки.

Действительно, в неявной схеме принято следующее выражение для потока влаги:

$$q_{i+0.5}^{j+1} = -k_i^j \left[\frac{p_{i+1}^{j+1} - p_i^{j+1}}{h} - 1 \right].$$

Градиент давления вычисляется для точки, лежащей между узлами, а коэффициент влагопроводности берется непосредственно в узле.

Казалось бы, более точным будет выражение

$$q_{i+0.5}^{j+1} = -\frac{k_{i+1}^j + k_i^j}{2} \left[\frac{p_{i+1}^{j+1} - p_i^{j+1}}{h} - 1 \right].$$

Однако оно плохо учитывает физику процесса. Узлы соединены *последовательно*, а не параллельно. Следовательно, складывать надо не влагопроводности, а гидравлические сопротивления

$$R = \frac{1}{k}.$$

Тогда

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2}{2},$$

откуда

$$\bar{k} = \frac{1}{\bar{R}} = \frac{2}{R_1 + R_2} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (2.42)$$

вместо

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2}.$$

Последние две формулы дают сильно различающиеся результаты при $k_1 \gg k_2$. Это физически естественно, потому что при *последовательном* соединении сопротивление (проводимость) почти полностью определяется «узким местом».

Итак,

$$q_{i+0.5} = -k_{i+0.5} \frac{p_{i+1} - p_i}{h}, \quad (2.43)$$

где

$$k_{i+0.5} = \frac{k_{i+1} \cdot k_i}{k_{i+1} + k_i}. \quad (2.44)$$

Здесь фактически для определения «средневзвешенного» значения теплопроводности используется функция, дающая *обратнопропорциональную* зависимость. Неплохие результаты дает также несколько другой прием, заключающийся в использовании в качестве взвешивающей функции самой зависимости теплопроводности от давления

$$k_{i+0,5}^j = k \left(\frac{p_i^j + p_{i+1}^j}{2} \right). \quad (2.45)$$

Величина k довольно быстро убывает с ростом абсолютной величины давления, поэтому расчет по этой формуле позволяет в первом приближении максимально просто учесть влияние «узкого места». Емкость почвы можно в первом приближении вычислять как среднеарифметическое емкостей в двух или трех соседних узлах.

В программе «Гидрофизика-75» (и последующих) [69] сквозной счет был реализован с использованием средневзвешенных гидрофизических характеристик.

8. ОДНОВРЕМЕННЫЙ РАСЧЕТ ВЛАГОЗАПАСОВ, ПОТОКОВ ВЛАГИ И ДРУГИХ ВЕЛИЧИН

Разностная неявная схема, описанная выше, позволяет найти давление почвенной влаги во всех узлах пространственно-временной сетки.

Однако часто нужно вычислить и другие характеристики водного режима почвы: влажность, влагозапасы, потоки влаги и др. Именно они чаще всего измеряются в полевых условиях и применяются в инженерных расчетах.

Лучше всего проводить такое вычисление не по одному расчетному уравнению, а на основе одновременного решения системы уравнений, описанной в главе 1. Решение разностного эквивалента этой системы уравнений осуществляется методом потоковой прогонки [78].

К сожалению, пока нет смысла рекомендовать этот прием для всеобщего использования. Опыт показал, что по ряду причин такое построение расчетной схемы целесообразно только при расчетах на достаточно мощных ЭЦВМ.

Поэтому пока применяется другой, более примитивный, часто менее точный, но очень простой способ. Для вычисления давления используется по-прежнему одно уравнение. По рассчитанным давлениям с помощью ОГХ находят объемные влажности. По ним, в свою очередь, вычисляются влажности в процентах от массы почвы. Влагозапасы

$$H = \int_0^z W dz$$

находятся с помощью одной из формул численного интегрирования. Целесообразно выдавать на печать колонку (вектор) значений влагозапасов для всех расчетных глубин от поверхности почвы.

По значениям давления вычисляется и поток влаги по простейшей формуле

$$q_{i-1}^j = k_{i-1}^j \left(1 - \frac{p_i^j - p_{i-1}^j}{h} \right). \quad (2.46)$$

Само давление вычисляется приближенно. Разность давлений в двух узлах, конечно, будет еще менее точна. Однако опыт показал, что в расчетах влагопереноса это несущественно, потому что мы все равно не знаем точно влагопроводности почвы.

Поскольку измеримыми величинами являются обычно потоки влаги за весь вегетационный период или за довольно длительные промежутки времени, целесообразно вычислять величины

$$Q = \int_t^t q dt \quad (2.47)$$

равные суммарному слою воды, прошедшему через данное сечение почвы за этот период.

Вычисление производится с помощью известных формул численного интегрирования, например

$$Q_i^{j,m} = \tau \sum_{j=M}^{M+1} q_i^j. \quad (2.48)$$

Отрезок времени mt равен времени между сроками наблюдений. Например, при сопоставлении расчетов на ЭВМ с наблюдениями в лизиметрах необходимо вычислять слой воды, прошедший через дно лизиметра за полсуток, сутки, или декаду (в зависимости от типа прибора).

Часто необходимо вычислить слой воды, прошедший через сечение почвы за другие промежутки времени. В принципе эту величину можно получить суммированием выводимых на печать значений суточных потоков. Однако удобнее производить суммирование непосредственно в ЭВМ и каждые сутки выводить на печать слой воды (*интегральные потоки*). Так мы называли величину, равную слою воды, прошедшему через поперечное сечение за время от начала расчета до данного момента. Тогда количество мигрирующей воды вычисляется для любого интервала времени с помощью одной операции вычитания. Кроме того, в ходе сравнения расчета с опытом оказалось, что величина интегрального слоя очень удобна для анализа и сопоставления с полевыми опытами (см. главу 4).

При большой интенсивности дождя некоторая часть осадков не успевает впитаться в почву и обычно стекает по поверхности.

Этот избыток осадков иногда называют просто поверхностным стоком. Но вода может и не стечь, а задержаться в ямках, или просто впитаться во время перерыва дождя, не достигнув ручейка. А. Н. Бефани предложил назвать эту величину *водообразованием*. Ею пользуются специалисты, занимающиеся паводками, склоновым стоком, эрозией почвы и др.

Водообразование обычно вычисляется на ЭВМ как разность между осадками и потоком влаги через поверхность почвы. Такая процедура предусмотрена, например, в программах «Гидрофизика-76 и 77».

На печать может выдаваться довольно много колонок цифр: давление (м вод. ст.), влажность объемная (см^3 воды/ см^3 почвы), влажность весовая (г воды/г почвы), потоки влаги (м/сут), интегральные потоки влаги (м), влагозапасы (мм) и др.

Не всегда нужно рассчитывать все эти величины. Поэтому в программу обычно вводится некоторое число вида 110100, в котором *единицы* соответствуют тем колонкам, которые нужны. В программе «Гидрофизика-77» реализован простейший вариант приема.

Некоторые другие способы техники проведения и оформления результатов аналогичных расчетов приведены в главе 3.

Переменный временной шаг

Для вычисления потоков влаги требуется значительно большая точность, чем для расчета остальных характеристик водного режима.

Основные источники ошибок — это исходные данные. Уточнение метода расчета должно идти прежде всего по пути разработки более совершенных методов определения влагопроводности.

Есть и другой малозаметный источник больших систематических ошибок: детальность данных о поступлении воды к поверхности почвы. Пока идет испарение — все хорошо. Сложности начинаются при выпадении значительных осадков на суглинистую почву.

Предположим, в течение получаса выпало 20 мм осадков. В остальную часть суток осадков нет и испарилось 8 мм воды. Если мы вводим в расчет *суточные* величины, то это будет соответствовать выпадению 12 мм влаги на поверхность почвы. Причем эти 12 мм «размазаны» на 24 часа. Средняя интенсивность такого «осредненного» дождя будет 0,5 мм/ч, в то время как в действительности 30 мин шел дождь интенсивностью 40 мм/ч.

Почва с коэффициентом фильтрации 24 мм/сут полностью впитает эти «размазанные» осадки. На самом деле большая часть дождевых вод должна была стечь (примерно 18—19 мм). И в общем за сутки влагозапасы должны были не увеличиться, а *уменьшиться*.

Ошибка в 20 мм при вычислении влагозапасов в метровом слое не так уж велика, но потоки влаги за сутки не только значительно изменятся, но и будут иметь *неверный* знак.

Для того чтобы не было таких погрешностей, можно вести расчет с помощью очень мелкой *равномерной* сетки с временным шагом, например, в 5 минут. На каждом шаге можно задавать новое *краевое* условие.

Гораздо лучше вести расчет с переменным шагом по времени, уменьшая длину шага при наступлении дождя. Для этого в ЭВМ вводятся даты, часы и минуты, которым соответствуют исходные метеоданные. Каждый отрезок между двумя последовательными датами разбивается на одно и то же число временных шагов (обычно на 30—100). Благодаря этому шаг автоматически получается более мелким при более частых сведениях о метеоситуации.

Опыт показал, что этот простой прием позволяет значительно уменьшить систематические ошибки. Одновременно несколько повышается точность вычислений, потому что мы проходим мелким шагом все интервалы времени с дождем, когда сам метод вычислений может давать наибольшие *чисто вычислительные* погрешности.

Имеется ряд различных модификаций этого приема. Одна из наиболее простых применена при разработке программы «Гидрофизика-77» [53, 69].

9. ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ

Простое уменьшение величины ячейки сетки — чрезвычайно универсальный, но мало эффективный метод повышения точности вычислений. Значительное увеличение количества машинного времени, памяти и стоимости расчета нежелательно, а часто просто невозможно.

Кажется естественным попытаться применить другую, более совершенную расчетную схему, чтобы добиться значительного *увеличения* точности расчета при тех же затратах труда и времени.

Сейчас во многих организациях ведется разработка собственных, иногда уникальных, алгоритмов и программ, для которых описанные в этой книге результаты являются как бы «начальным условием». Пятилетний опыт применения описанной выше методики в десятках организаций показал, что в ходе внедрения геофизики и работники ВЦ всегда пытаются внести в методику нечто новое, лучшее, «свое». Желательно, разумеется, применять в этих разработках более совершенные расчетные схемы.

На протяжении последних десяти лет автор неоднократно консультировал подобные работы. При этом выяснилось, что пути усовершенствования, которые выбираются, как правило, почти идентичны. Очень похожи ошибки и неудачи, которые

часто сопутствуют этим разработкам. Практически каждый начинающий повторяет одни и те же ошибки.

Цель этого раздела — составить хотя бы приблизительную и неполную картину этих исканий.

Аппроксимация

Разность давлений в двух соседних узлах сетки

$$p_{i+1} - p_i \approx h \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2.49)$$

Это равенство будет точным, если значение производной будет взято в некоторой точке, лежащей между узлами. Положение этой точки почти всегда неизвестно, но если давление меняется непрерывно, то такая точка всегда есть.

Если взять значение производных в узле i , то разложение в ряд Тейлора дает

$$p_{i+1} - p_i = h \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{h^3}{2 \cdot 3} \frac{\partial^3 p}{\partial z^3} + \dots \quad (2.50)$$

Отсюда разность между точным значением производной и ее разностным выражением

$$\frac{p_{i+1} - p_i}{h} - \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{h}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{h^2}{6} \frac{\partial^3 p}{\partial z^3} + \dots$$

Если величина шага достаточно мала, то величинами, умноженными на квадрат, куб и более высокие степени длины шага, можно пренебречь. Тогда

$$\frac{p_{i+1} - p_i}{h} - \frac{\partial p}{\partial z} \approx Ah;$$

обычно пользуются специальной формой записи

$$\frac{p_{i+1} - p_i}{h} - \frac{\partial p}{\partial z} = O(h), \quad (2.51)$$

обозначающей, что разница между точным и приближенным значением производной растет примерно пропорционально величине шага. Причем эта «малая» величина, этот «нуль», может быть очень велика, если вторая производная велика. Чем более выпукло или вогнуто решение, чем большую кривизну оно имеет, тем хуже.

Формулами типа (2.51), в которые входят «нули», оценивают обычно степень приближения (*аппроксимацию*), даваемую разностными выражениями.

Изобилие разностных схем

Производную можно аппроксимировать разностной формулой по-разному. Например, производную давления в узле можно выразить формулой (2.51). Это будет «вперед». А вот «назад»:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{p_i - p_{i-1}}{h} + O(h). \quad (2.52)$$

Часто говорят о *правой* и *левой* разностных производных, понимая что счет индексов идет слева направо.

Центральная разностная формула

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{2h} + O(h^2)$$

считается более точной. У нее погрешность аппроксимации обычно порядка $O(h^2)$.

В этом легко убедиться с помощью все тех же рядов Тейлора. Но разложение надо вести для *производных* взятых в узле i .

Возможность по-разному аппроксимировать производные позволяет для *одного и того же* дифференциального уравнения написать великое множество разностных схем. В расчетном уравнении есть производные по времени, первые и вторые производные по глубине. Изменим запись вначале только одной производной, потом другой, потом всех вместе.

Производная в формуле верхнего краевого условия также дает простор для экспериментов. Но есть еще коэффициенты, у которых тоже имеются индексы, их можно осреднять по разным узлам, интерполировать, экстраполировать.

Выбор схемы

Казалось бы, что выбирая схему с хорошей аппроксимацией, мы получим большую точность. Идея кажется совершенно «очевидной». Надо просто выразить все производные через *центральные* разности. И за счет большей точности мы получим возможность вести расчет более крупными шагами.

Вот один из наиболее известных примеров.

Если взять *центральную* производную по времени, то разностная схема будет иметь вид

$$\frac{p_i^{j+1} - p_i^{j-1}}{2\tau} = A^j. \quad (2.53)$$

Поскольку такая схема имеет лучшую аппроксимацию *по времени*, то, казалось бы, она *должна* давать возможность вести расчет с более крупным временным шагом.

Но она дает *конечную* скорость передачи информации по глубине и поэтому *неустойчива*. При этом она еще более неустойчива, чем обычная явная схема. Поставив в левой части индекс $(j-1)$ вместо j , мы уменьшили степень передачи информации от узла j к узлу $(j+1)$.

В вычислительной математике эта схема называется *безусловно неустойчивой* или даже «абсолютно» неустойчивой. Из-

вестно, что подобного рода схемы неустойчивы при любых, как угодно малых шагах по времени.

На самом деле можно показать, что при очень плавном изменении краевых условий и очень малых шагах по времени с помощью этой схемы можно посчитать кое-что на небольшой отрезок времени вперед (пока не захлестнет накапливающимися ошибками). Но теория разностных схем — молодая наука, и поэтому предпочитает категорические выражения.

Прикладные расчеты на ЭВМ влагопереноса в почве — еще более молодое направление. И если нас не устраивает *условно устойчивая* явная схема, то схема (2.53) и подавно не годится

Аппроксимация и устойчивость

Поскольку улучшение аппроксимации само по себе может быть даже вредным, естественно потребовать, чтобы одновременно была обеспечена хорошая аппроксимация и устойчивость.

Схемы такого рода предлагаются в различных учебниках и статьях по гидрологии почв. Приведем наиболее известную из них.

Возьмем явную схему

$$p_i^{j+1} = p_i^j + A^j \quad (2.54)$$

и неявную

$$p_i^{j+1} = p_i^j + A^{j+1}; \quad (2.55)$$

получим некоторый гибрид

$$p_i^{j+1} = p_i^j + \frac{A^{j+1} + A^j}{2}, \quad (2.56)$$

называемый обычно схемой Крэнка — Никольсона.

В литературе по вычислительной математике доказывается, что (по крайней мере, при постоянных коэффициентах и отсутствии — гравитации) эти схемы имеют следующую аппроксимацию:

- 1) явная $O(h^2) + O(\tau)$;
- 2) неявная $O(h^2) + O(\tau)$;
- 3) гибрид $O(h^2) + O(\tau^2)$.

Схема Крэнка — Никольсона имеет лучшую аппроксимацию по временному шагу за счет «центрирования» производных.

Но самое главное — строго доказывается, что *гибрид* должен унаследовать *безусловную* устойчивость неявной схемы.

Практические расчеты показывают, что результаты получаются «странные». Правда, ЭВМ не останавливается, но на рассчитанных эпюрах влажности появляются волны, иногда довольно большие. Даже в тех случаях, когда краевые условия изменяются очень плавно и никакой «ряби» не должно быть,

наблюдается что-то похоже на неустойчивость явной схемы в начальный период ее проявления.

Таким образом, гибрид унаследовал некоторые плохие качества явной разностной схемы. Их, правда, удастся погасить, сильно уменьшив ячейку сетки. Но это, конечно, не выход.

Мы получили гибрид как среднеарифметическое явной и неявной разностных схем, но могут быть и другие промежуточные варианты. Опыт показывает, что все они генерируют «рябь». Однако чем больший сдвиг делается в сторону неявной схемы, тем меньше «рябь».

Что такое устойчивость

Обычно устойчивыми называют системы, которые при *малых* изменениях их характеристик и режима не испытывают *качественных изменений*. Слова «малые» и «качественные» — определяются по-разному.

Понятие устойчивости появилось в теории разностных схем лет двадцать назад и формулировка его за это время неоднократно изменялась и обобщалась. Грубо говоря, математическое определение понятия безусловной устойчивости разностной схемы сводится к следующему:

1) при небольших изменениях исходных данных вычисляемая величина *давления* также должна меняться мало и плавно;

2) при любом плавном изменении шагов по глубине и времени вычисляемая величина *давления* тоже должна меняться *очень* плавно.

Все эти определения устойчивости, выраженные в виде слов или формул, имеют дело только с разностью между значениями *того же давления*.

Расхождения между *градиентами* давлений не принимаются во внимание. Поэтому разностная схема, дающая «рябь», считается безусловно устойчивой, если только при уменьшении ячейки сетки «волны» становятся все меньше и меньше. Так что никакого противоречия тут нет. Устойчивость и аппроксимация разностной схемы обеспечивают *сходимость*, т. е. неограниченное и плавное стремление приближенного решения к точному при *неограниченном* уменьшении шага.

Но из этого вовсе не следует, что при данной *конечной* величине шага не будут наблюдаться «волны». Гарантируется только то, что амплитуда их будет конечной и должна уменьшаться при уменьшении ячейки сетки.

Разумеется, для *прикладных* расчетов этого недостаточно.

Монотонность

Очевидно, что необходимо переопределить понятие устойчивости, сделав его более жестким. Но тогда придется менять всю терминологию. Схемы, которые были столь категорично объявлены абсолютно устойчивыми, безусловно устойчивыми, придет-

ся называть как-то иначе. Это нежелательно, потому что математические разработки более общих понятий и критериев устойчивости все еще очень далеки от завершения.

Чтобы не было воли, достаточно потребовать, чтобы разностная схема не давала большего числа экстремумов, чем точное решение.

Нечто менее общее, но более удобное для исследования стандартными методами было предложено С. К. Годуновым. Вводится понятие *монотонной* разностной схемы, которая при монотонных начальных условиях не генерирует максимумов и минимумов.

Для нашего случая это не совсем подходит. Даже при постоянной начальной влажности гравитационное стекание к водоупору или границе слоев может дать максимумы. Но можно применить эту идею, потребовав, чтобы наша разностная схема при *отсутствии гравитации* (в горизонтальной колонке) была монотонной.

Тогда, используя известный *принцип максимума* [73] нетрудно доказать, что схема Крэнка — Никольсона немонотонна при достаточно больших шагах.

Таким образом, необходимы уже три условия: аппроксимация, устойчивость, монотонность. Но это еще не все.

Консервативность

До сих пор мы говорили о попытках улучшить аппроксимацию *производных*. Но можно усовершенствовать расчетную схему, введя более точный способ вычисления коэффициентов. А они не только зависят от значения давления, но и могут быстро меняться по глубине и времени. И даже быть разрывными для *идеально-слоистого* грунта.

В разделе 7 мы видели, что «уточнение» коэффициентов путем вычисления их в виде «среднеарифметических»

$$\bar{k}_i = \frac{k_{i+1} + k_{i-1}}{2} \quad (2.57)$$

физически не совсем верно. Посмотрим, к каким ошибкам может привести такое «уточнение».

Поток влаги в горизонтальной колонке почвы

$$q = -k \frac{\partial p}{\partial z},$$

тогда, если

$$q_i = \frac{k_{i-1} + k_{i+1}}{2} \frac{p_{i-1} - p_{i+1}}{h}, \quad (2.58)$$

то даже для насыщенной фильтрации поток влаги будет вычисляться правильно только для *однородного* грунта.

Обратим внимание на то, что ошибка будет *систематической*. При последовательном соединении общая проводимость цепи сильнее всего зависит от *узкого места*. Поэтому истинная проводимость

$$\overline{k} = \frac{2 k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}.$$

должна быть *всегда меньше*, чем среднеарифметическая. Это легко доказать математически:

$$\overline{k} - \bar{k} = \frac{(k_1 + k_2)^2 - 4 k_1 k_2}{2 (k_1 + k_2)} = \frac{(k_1 - k_2)^2}{2 (k_1 + k_2)} \geq 0. \quad (2.59)$$

Даже для насыщенной фильтрации в слоистом грунте *ошибка не становится меньше с уменьшением величины шага*.

Систематическая ошибка в вычислении потока влаги физически соответствует случаю, когда часть потока отбирается или добавляется. «Уточнение» коэффициентов с помощью формулы (2.57) всегда преувеличивает поток. Это равносильно появлению *источников*, подающих воду в данную точку профиля почвы.

Другими словами, «уточнение» приводит к нарушению закона сохранения массы. В некоторых случаях могут наблюдаться явления «переполнения». Это так называемая *коэффициентная неустойчивость* (КО-неустойчивость).

К аналогичным результатам может приводить аппроксимация производных коэффициента влагопроводности центральными разностями. А. Н. Тихонов и А. А. Самарский приводят [76] очень простой пример, в котором сохранение массы нарушается, и разностное уравнение при любых как угодно малых шагах сходится к решению, отличающемуся от точного.

Опыт подобного рода неудач привел математиков к идее конструировать схемы так, чтобы выполнялось уравнение сохранения массы, или, во всяком случае, не возникало источников и стоков.

Сохранение называют консервацией. Отсюда термин *консервативность* схемы.

Со временем оказалось, что и консервативные схемы дают «странные» результаты. Оказалось, что даже если масса сохраняется и дополнительных источников не возникает, «чудеса» могут получаться из-за нарушения *других* законов сохранения; например, законов сохранения импульса, момента количества движения и др.

Появилось понятие *вполне консервативных* схем. Это означает, что все законы сохранения не должны систематически нарушаться.

Как оказалось позже, вполне консервативные схемы также могут давать необычные результаты. Но теперь специалисту по физике процесса или инженеру уже много труднее сразу забраковать результаты расчета или вычислительную схему.

Итак, отметим, что теперь требований стало уже *четыре*: аппроксимация, устойчивость, монотонность, полная консервативность.

Предиктор — корректор

Расчетную схему всегда можно рассматривать как «прогноз» на шаг вперед (по времени).

Верные значения коэффициентов (гидрофизических характеристик) для прогноза должны вычисляться по давлениям, соответствующим какой-то точке, лежащей *между* узлами. При расчете по обычной неявной схеме мы ошибаемся за счет того, что берем коэффициенты, лежащие на *предыдущем* временном слое.

Поэтому вначале проводят прогноз на шаг вперед по обычной неявной схеме. Но это не расчетный шаг, а *предиктор*.

Затем, вместо того чтобы продвинуться еще на шаг вперед, возвращаются назад, к исходной точке, и делают прогноз с *вторым* большим шагом по времени. При этом «большом скачке» коэффициенты определяются по давлениям, вычисленным с помощью предиктора.

Идея такая. Если бы мы не возвращались, а сделали бы два последовательных малых шага, то на каждом шаге пришлось бы брать не совсем верные значения коэффициентов на предыдущем слое. Мы тоже сделали два шага, но большой шаг у нас вычисляется с коэффициентами, взятыми *посередине*, и, наверное, более точными. Этот второй большой шаг должен дать более точные, более корректные результаты. Поэтому он и называется *корректор*.

Иногда действительно получается точнее, но в некоторых случаях — хуже. Ясно, что если процесс однонаправленный (например, инфильтрация), то результаты будут лучше. А когда влажность то уменьшается, то увеличивается, результаты будут хуже.

Если изменения режима происходят медленно, то расчет с помощью предиктора — корректора даст примерно такие же результаты, как по обычной неявной схеме.

Если изменения влагообмена происходят очень быстро и коэффициенты очень сильно зависят от влажности, то точка со «средними» коэффициентами может лежать довольно далеко от середины расстояния между временными словами. Здесь предиктор может дать недостаточно точные результаты.

В природе наблюдаются продолжительные периоды с медленным изменением влажности (испарение летом; зима). В течение относительно коротких отрезков времени режим меняется очень быстро (дожди, поливы). Происходит чередование этих типов поведения. Поэтому метод предиктор — корректор обычно не дает существенного улучшения результатов, зато иногда появляются некоторые «странности».

Итерации

Уточнение коэффициентов можно провести еще одним способом, особенно удобным при расчетах на мощных ЭЦВМ.

Вычисляя с помощью обычной разностной схемы давление на шаг вперед, получают первое приближение. Затем возвращаются к исходной точке и повторяют прогноз, но теперь коэффициенты берут уже по результатам расчета первого приближения. Повторяя этот процесс, можно получать все более точные приближения.

Сама идея очень привлекательна, потому что современные ЭВМ очень хорошо приспособлены для *итераций* (многократного повторения одной и той же операции). Однако теоретическое исследование и практика расчетов показывают, что здесь имеются некоторые «подводные камни».

Во-первых, надо доказать, что последовательные приближения всегда непрерывно приближаются (сходятся) к некоторому пределу. Во-вторых, этот предел должен быть не каким угодно, а именно решением наших расчетных уравнений. В-третьих (и это самое сложное), надо оценить, с какой скоростью происходит это приближение, т. е. получить оценку скорости сходимости.

Итерации надо рано или поздно остановить и перейти к следующему временному шагу. Обычно либо проводят определенное количество итераций, либо прекращают процесс, когда два последовательных приближения достаточно близки. Второй способ кажется более привлекательным, но также недостаточно эффективен.

Идеальный способ регулирования числа итераций — по разности между *точным* и приближенным решением. Но точное решение мы не знаем. Значит, надо иметь какую-то формулу, которая гарантировала бы, что после данной итерации мы находимся вблизи точного решения; что разность между точным и приближенным решением меньше, чем заданное число.

Обычно такого критерия, такой теоретической оценки нет. На практике критерий остановки итераций получают просто сравнением с некоторым аналитическим решением или опытными данными. Иногда проводят численные опыты с разным количеством итераций, чтобы эмпирически найти критерий. Итерации увеличивают машинное время, необходимое для расчетов. В некоторых работах по вычислительной математике указывается, что, несмотря на это, расчет с итерациями аналогичных задач позволяет затрачивать меньше машинного времени. Идея здесь все та же: за счет более высокой точности определения коэффициентов иногда можно увеличить временной шаг.

В прикладных расчетах естественного режима влагопереноса уменьшение затрат машинного времени получается очень редко. Указывается специфика задачи — смена периодов быстрого и очень медленного изменения режима.

Успешные опыты экономии машинного времени, описанные в литературе по вычислительной математике, относятся в основном к нестационарным процессам типа инфильтрации. В периоды медленного изменения влажности (испарение) итерации не дают выигрыша.

Если остановка итерационного процесса планируется по разности между последовательными приближениями, то возникает еще один чисто технический недостаток. Никогда неизвестно точно, сколько машинного времени займет расчет. Если, например, в среднем на каждом шаге ЭВМ проведет не две итерации, а шесть, то понадобится втрое больше машинного времени. Никогда не знаешь, сколько машинного времени надо заказать, успеет ли расчет полностью завершиться в отведенное время.

Несмотря на описанные выше недостатки, следует рекомендовать включение итерационных способов уточнения коэффициентов и специально разрабатываемые программы для мощных ЭЦМ. Поделимся на существенное увеличение точности или скорости расчета не следует, но зато увеличивается *надежность*.

Итерации чувствительны к сбоям и грубым ошибкам в исходных данных. Счет либо прекращается, либо зацикливается из-за бесконечного повторения итераций на одном и том же временном шаге. При некотором опыте «помехи» чувствуются по изменению скорости выдачи результатов на печать.

Другим, более важным преимуществом является то, что улучшаются качество и надежность расчетов при влажности, близкой к полному насыщению. Это физически естественно, ведь в этом случае коэффициенты влагопроводности лучше брать не на предыдущем, а на последующем временном слое.

На основе этой идеи возможны очень интересные способы организации итерационного процесса. К сожалению, описание их выходит за рамки этой книги. Описание основных методов можно найти в трудах, посвященных разностным методам решения *эллиптических* уравнений. Там итерации — основной способ получения решения.

Интересная схема организации итераций при расчете на ЭЦМ влагопереноса в почве предложена в работе [97].

Аппроксимация и точность

На основе идеи лучшей аппроксимации пока еще не удалось создать схем, которые позволяли бы вести расчет влажности с большим шагом по времени, сохраняя необходимую точность, хотя пока не доказано, что такую схему нельзя найти.

Существует, однако, мнение, что при очень малых шагах схемы с худшей аппроксимацией дают менее точные результаты. Поэтому для расчетов, сопоставляемых с *точными лабораторными опытами*, в некоторых зарубежных работах применялись

схемы повышенной точности. Однако не следует думать, что эти расчеты более точны.

Для того чтобы лучшая аппроксимация дала большую точность, необходимо соблюдение ряда условий, которые почти никогда не выполняются.

Необходима, в частности, *равноточность всех элементов расчета*. Во-первых, должна быть одинаково хорошая аппроксимация производных по глубине и времени. А также коэффициентов и всех исходных данных. И, конечно, краевых условий и условий «склеивания» генетических горизонтов.

Порядок аппроксимации расчетной схемы определяется узким местом.

Вот одна из типичных ошибок. Имеется десять пар чисел, определяющих зависимость давления от влажности (ОГХ). Если при расчете на ЭВМ операция перехода от давления к влажности осуществляется с помощью линейной интерполяции, то отсюда возникает чисто вычислительная ошибка, которая *сводит на-нет выигрыш, получаемый за счет улучшения аппроксимации*.

А сглаживание ОГХ с помощью плавной и «удобной» аналитической зависимости может еще более уменьшить точность расчета.

Во-вторых, лучшая аппроксимация дает большую точность только если *соотношение* между шагами по времени и глубине выбрано правильно. Но критерия для определения оптимального соотношения пока нет. Между тем известно, что если, например, неограниченно уменьшать шаг по глубине, не меняя временной шаг, то точность не увеличивается, а может даже уменьшиться.

Существуют еще и другие источники ошибок.

ГЛАВА 3

ОТ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДО ЧИСЛА

В общем реализация расчетной схемы, описанной в предыдущей главе, очень проста. Здесь нет принципиальных трудностей, но есть временные.

1. ОТ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

Сейчас существует два основных способа, с помощью которых можно составить программу для ЭВМ.

Во-первых, можно задать ряд простейших последовательных команд, которые ЭВМ будет выполнять. Это, с точки зрения машины, лучший способ. Программа будет максимально простой и вычисления будут идти быстро.

Но человек плохо воспринимает этот язык. Психология людей несовместима с этой идеей.

Во-вторых для составления программ прикладных расчетов на ЭВМ переноса можно применять языки, созданные для разъяснения ЭВМ алгоритмов научно-инженерных расчетов. Это прежде всего «Фортран» — очень простой и помехоустойчивый и «Алгол» — более богатый и универсальный.

Каждый из этих языков имеет ряд вариантов и со временем обогащается. Опыт показал, что для прикладных расчетов переноса лучше всего использовать наиболее «бедный» вариант языка, не включающий «новинок». В противном случае малые и средние ЭВМ могут «не понять», о чем идет речь.

Большая часть программ [53, 69] составлена на языке «Алгол-60». Некоторые из них в процессе внедрения «переводились» на «Фортран» работниками ВЦ.

Неизвестно, может ли машина полностью заменить человека, но алгоритмических языков она не понимает. Ей известен только язык команд.

Поэтому составляется специальная вспомогательная программа, называемая *транслятором* (переводчиком). Программа на «Алголе» вводится в ЭВМ и транслятор выполняет перевод инструкции для расчетов переноса с алгоритмического языка на язык команд. Затем перевод записывается на перфокарты. Эта колода перфокарт и представляет собой *рабочую программу*, то, что мы должны ввести в ЭВМ вместе с исходными данными, чтобы машина произвела нам расчет.

Составление программ на алгоритмических языках увеличивает машинное время, необходимое для расчета переноса в

почве. Многие вычисления выполняются более общим, но не лучшим способом.

Но составление программ для массовых прикладных расчетов на ЭВМ в командах еще более нежелательно, потому что ЭВМ другого типа может «не понять», о чем идет речь или истолковывать указание неправильно.

Создание программы на основе расчетной схемы — длительная и трудоемкая работа, требующая большой внимательности. Нельзя допустить ни одной даже совсем незначительной опечатки. В противном случае, как выражаются математики, процесс составления программ не будет сходиться.

Составление программы на алгоритмическом языке осуществляется средним человеком гораздо скорее, чем в командах.

Существуют различные вспомогательные средства, например программы, которые обнаруживают противоречия с правилами грамматики языка.

Несмотря на это, составление и *отладка* одной программы для прикладных расчетов влагопереноса в почве занимает обычно несколько месяцев.

Но даже когда программа *пошла* и что-то считает, нельзя быть уверенным, что в ней все правильно. Опечатка или неточность может остаться не обнаруженной до поры до времени. Никакой гарантии вычислительная математика здесь не дает.

Поэтому помимо отладки программы применялась еще и *обкатка*, т. е. многочисленные проверочные расчеты и детальное сравнение их с опытными данными и аналитическими решениями.

2. ЭЦВМ

Сейчас в СССР эксплуатируется много разнообразных отечественных и импортных ЭВМ. Описание их устройства и особенностей работы можно найти в обширной литературе по вычислительной технике. Здесь будет приведено только краткое описание некоторых деталей, существенных для реализации данной задачи.

Все типы ЭЦВМ, работающие и проектируемые сейчас, позволяют проводить прикладные расчеты водного режима почвы. Разным будет только необходимое для таких вычислений машинное время. *Приближенная* оценка его дана в табл. 3.

Опыт показывает, что существенной для прикладных расчетов влажности почвы оказывается *только одна* характеристика ЭЦВМ — быстродействие. Приводимая в рекламных проспектах оценка быстродействия всегда является завышенной. Грубо говоря, это быстрота, с которой производится сложение двух чисел. Однако эту характеристику можно использовать как *относительную*, для приближенного сравнения возможностей разных ЭЦВМ.

Лабораторные исследования влагопереноса — это обычно многочисленные опыты продолжительностью в несколько суток

Таблица 3

Выходные данные разных типов ЭВМ при расчете водного режима почв

Эксплуатируемые ЭВМ	Наири-2	Минск-22	БЭСМ-4 Минск-32 М-220А, М-222	Весна		БЭСМ-6
Серийно выпускае- мые ЭВМ	Мини- ЭВМ		Наири-3 ЕС-1020	М-6000 ЕС-1030	Наири-4 ЕС-1050 ЕС-1040	ЕС-1060
Быстродействие, тысячи операций в секунду	1	5	20	100	500	1000
Примерное время расчета водного режима за один год, часы машин- ного времени	200	40	10	2	1	0,5

или недель. Расчет за такие интервалы времени даже на мини-ЭВМ можно провести за несколько часов.

В отличие от этого расчеты естественного режима для проектирования, регулирования или сопоставления с наблюдениями приходится вести за периоды порядка года, а часто для многих лет и многих пунктов.

Расчет «по кускам»

Современная ЭВМ состоит из очень многих деталей. Чем сложнее система, тем больше вероятность отказов и поломок. В среднем ЭЦВМ может непрерывно работать примерно десять часов. Многое зависит от культуры обслуживания на ВЦ.

При расчетах на мини-ЭВМ целесообразно разбивать исходные данные на ряд «кусков» так, чтобы в каждый входило несколько месяцев (целых). Каждые 8 ч происходит смена персонала ЭВМ. Желательно, чтобы расчет каждого куска происходил внутри одной смены.

При расчете каждого куска надо использовать разные начальные условия. Расчет первого куска ведется по «истинным» начальным условиям. Для каждого следующего куска начальные давления берутся по *конечным* результатам расчета предыдущего куска.

Счет по кускам иногда приходится применять не только на малых, но на средних и даже больших ЭЦВМ. Очень часто нет возможности выделить большие отрезки машинного времени.

Благодаря возможности расчета «по кускам» объем оперативной памяти никогда не является лимитирующей величиной. Если памяти не хватает, куски делаются более мелкими.

Стоимость одного часа машинного времени ЭВМ типа ЕС-1020 примерно в 2—3 раза меньше, чем БЭСМ-6 или ЕС-1060. Однако производительность расчетов возрастает много быстрее, так что расчеты влагопереноса в почве на мощных ЭВМ экономичнее и, конечно, более удобны.

Расчеты на малых и средних ЭВМ стоят довольно дорого. Например, вычисление водного режима почвы за один год на ЭВМ типа ЕС-1020 или БЭСМ-4 стоит около 300 рублей. Этот же расчет на ЕС-1060 требует машинного времени на сумму около 10 рублей. Однако следует учитывать, что обычно ЭВМ с малым быстродействием очень слабо загружены и зачастую простаивают во вторую и третью смены, а также в выходные дни. Это считается экономичным.

Здесь целесообразно подчеркнуть, что описываемые расчеты идеально приспособлены для загрузки малых и средних ЭЦВМ в эти периоды. Если ЭВМ исправна, расчеты идут на протяжении многих часов без вмешательства оператора.

Хотя с точки зрения ортодоксальной экономики такие расчеты «невыгодны», на самом деле они наиболее экономичны.

Быстродействие ЭВМ все время увеличивается. Начат выпуск мини-ЭВМ Наир-4 с быстродействием порядка 100 000 операций в секунду. Так что со временем экономические ограничения не будут играть никакой роли в прикладных расчетах влагопереноса в зоне аэрации.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

С чисто математической точки зрения для расчета надо иметь:

- 1) начальное условие: распределение давления по глубине в начальный момент;
- 2) нижнее краевое условие: давление на некоторой заданной глубине;
- 3) зависимость коэффициентов расчетного уравнения от давления (гидрофизические характеристики почвы);
- 4) верхнее граничное условие: поток влаги (или влажность) на поверхности почвы как функция времени.

Однако физика процесса и принятая расчетная схема таковы, что на самом деле можно иметь несколько меньше исходных данных.

Начальное условие

Поскольку расчетная схема *автокомпенсирована*, не обязательно иметь данные о начальном условии.

Если мы знаем распределение влажности в момент, с которого нам нужно начать расчеты, то, конечно, можно вычислить начальное распределение давления с помощью ОГХ.

Если в начальный момент наблюдения не производились, но есть измерения влажности в некоторый *предшествующий* срок, то можно ввести их в расчет. Для этого начинают вычисления с того дня, когда были произведены замеры. Точность результатов от этого не *изменяется*.

Если данных наблюдений за влажностью в данном пункте нет, то проводят расчет, принимая, что в начальный момент давление распределено по глубине по гидростатическому закону

$$t = 0; \quad z > 0; \quad p = z - \xi,$$

где ξ — глубина уровня грунтовых вод.

В последнем случае расчет следует начать с некоторого *предшествующего* момента времени, так чтобы до начала расчетного периода окончился период компенсации (см. главу 1). После истечения периода компенсации начальное условие практически не влияет на результаты расчета.

Время компенсации можно приближенно оценить с помощью формулы

$$\tau = 0,3 \frac{\xi}{k_0},$$

где k_0 — коэффициент фильтрации почвы.

В тех случаях, когда нужно уточнить значение времени компенсации, проводятся контрольные методические расчеты с заведомо «мокрыми» и «сухими» начальными условиями. Время компенсации определяется по моменту совпадения результатов расчета обоих вариантов с точностью до трех значащих цифр.

Гидростатическое распределение особенно хорошо соответствует естественным условиям весны, сразу после схода снежного покрова. Но можно задавать другие фиктивные начальные условия, например, полевую влагоемкость после сильного дождя или полива.

Нижнее краевое условие

Обычно задают просто давление на глубине, равной уровню грунтовых вод. В соответствии с определением УГВ как глубины, начиная с которой вода больше не удерживается в почве капиллярно-сорбционными склонами и вытекает, давление на УГВ должно быть равно нулю.

Но глубина, на которой залегает УГВ, изменяется со временем. Следовательно, надо задать хронологическую таблицу УГВ на каждые сутки. Если УГВ залегает глубже 4—5 м от поверхности почвы, то влияние нижнего краевого условия на результаты расчета влажности довольно слабое. Поэтому в этих случаях можно вводить в расчет ориентировочные значения УГВ.

При моделировании или расчете проектируемых мелиоративных систем в расчет вводится предполагаемый или проектируемый УГВ.

До сих пор мы описывали возможности сокращения количе-

ства исходных данных, которые не приводят к изменению точности результатов. В следующем разделе показано, что количество исходных данных может быть еще более уменьшено. Но это приводит к существенной потере точности.

4. КАК ПОЛУЧИТЬ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Приведем еще раз исходные данные, необходимые для расчета, с точки зрения геофизика или проектировщика.

Их надо брать из архива (библиотеки) или измерить, или просто задать при моделировании и проектировании.

1. Физические (гидрологические) свойства почвы.

2. Метеоданные по ближайшей станции или посту УГМС.

3. Данные о уровне грунтовых вод (если он достаточно близок к поверхности почвы).

Наибольшие затруднения обычно вызывает определение исходных данных о гидрофизических характеристиках почвы (влагопроводность и ОГХ). Здесь возможно несколько разных вариантов.

Поскольку эти данные более всего влияют на точность расчетов, лучше выехать на место, отобрать монолиты и провести необходимые определения. Это обычно занимает не более месяца. Можно заказать выполнение этой работы в одной из почвенных лабораторий (см. раздел 7 главы 5).

Однако опыт показал, что многие хотят получить эти данные расчетным путем. Такие методы существуют. Без особой потери точности можно рассчитывать влагопроводность по стандартным агрогидрологическим свойствам почвы или по ОГХ, если имеются измеренные фильтрации [9, 10, 18].

Если нет измеренных коэффициентов фильтрации, их можно вычислить или по гранулометрическому составу, или по другим физическим характеристикам почвы, или по ОГХ [3, 10, 18, 30, 33, 74, 98]. Но точность расчета резко уменьшится.

Наконец, если нет ОГХ, то можно [54] приближенно рассчитать ее по стандартным агрогидрологическим свойствам почвы, таким, как максимальная гигроскопичность, влажность завядания, полная влагоемкость, пористость, объемный вес.

Следует подчеркнуть, что использование гидрофизических характеристик почвы, полученных расчетным путем, всегда сильно снижает точность полученных результатов. Особенно это относится к ОГХ. Поэтому все эти приемы можно рекомендовать только для моделирования, ориентировочных расчетов и некоторых специальных научных разработок.

Метеоданные и уровень грунтовых вод

Измерения осадков всегда проводятся на метеостанциях и постах. Лучше вводить в расчет данные по плювиографу, имеющие большую разрешающую способность.

Во все данные об осадках надо вводить поправки, поскольку действующие на сети осадкомеры и плевниографы всегда дают систематические ошибки. Обычно осадки *преуменьшены*.

Иногда на метеостанциях есть данные о испарении с почвы. Но даже в этом случае трудно оценить их репрезентативность. Если данных по испарению нет, то можно вычислить их по наблюдениям за температурой и влажностью воздуха [35, 89].

Сведения о поливах обычно имеются в эксплуатационных гидромелиоративных службах. Они менее точны, чем метеоданные.

Измерения уровня грунтовых вод проводятся на сети гидрологических, гидрогеологических, агрометеорологических и опытно-мелиоративных станций. Если УГВ залегает глубоко, можно в первом приближении принять его постоянным и равным уровню в ближайшем колодце.

5. МАССИВЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Некоторые исходные данные всегда представляют собой таблицы чисел (осадки, глубина УГВ). Другие же (например, влагопроводность) могут быть представлены в виде формул.

При разработке *уникальных* программ расчета ЭЦВМ лучше вводить все, что можно, в виде формул. Тогда расчет идет быстрее, несколько точнее и меньше хлопот с подготовкой исходных данных.

В программах для массовых *прикладных* расчетов влагопереноса в почве необходимо предусмотреть ввод всех исходных данных в виде таблиц. Это связано с тем, что мы пока не имеем универсальных формул для описания гидрофизических характеристик почвы и испарения.

Существует очень большое количество разных модификаций методик расчета испарения; некоторые из них оформлены в виде программ и не имеют аналитического выражения. Различны и исходные данные, необходимые для разных методик.

В этих условиях не следует ограничивать возможности расчетчика необходимостью применения определенной формулы. Пусть каждый вводит в расчет исходные данные, рассчитанные так, как он считает правильным. Наконец, может быть случай, когда есть *наблюдаемые* величины влагопроводности или испарения, а это всегда таблицы.

Если для расчета каких-либо исходных данных используется определенная формула, удобно поручить подготовительные вычисления мини-ЭВМ. Лучше если результат будет выдан в виде перфокарт, которые можно ввести в большую ЭЦВМ.

В ЭВМ фактически вводится не таблица, а ряд следующих друг за другом чисел (массив).

Есть два способа введения данных о краевых условиях на верхней границе. Можно отдельно ввести массив испарения, массив осадков, массив поливов. Чаще вводят вместо трех только

Таблица 4

Массивы гидрофизических характеристик, Казахстан;
ОГХ определена методом сенсора (раздел 7 главы 1);
влагопроводность вычислена по формуле А. И. Будаговского [9].
Аналитики: М. Н. Басмановская и Л. Л. Журавлева

№ пп.	ρ , м вод. ст., $\sim 10^4$ Па	5 почва		6 почва		7 почва	
		W вес, г/г	$k_{вл}^*$ мм/сут	W вес, г/г	$k_{вл}^*$ мм/сут	W вес, г/г	$k_{вл}^*$ мм/сут
1	0,00						
2	-0,50	0,300	48,5	0,270	58,7	0,212	71,2
3	-1,00	0,297	46,3	0,268	56,6	0,212	71,2
4	-1,50	0,295	44,7	0,267	55,5	0,211	69,2
5	-2,00	0,293	43,2	0,265	53,4	0,211	69,2
6	-2,50	0,290	40,9	0,263	51,2	0,211	69,2
7	-3,00	0,288	39,5	0,261	49,1	0,211	69,2
8	-3,50	0,286	38,1	0,259	47,0	0,211	69,2
9	-4,00	0,284	36,7	0,258	46,1	0,210	67,6
10	-4,10	0,283	36,1	0,257	45,2	0,210	67,6
11	-4,20	0,272	29,3	0,247	36,7	0,210	67,6
12	-4,30	0,258	21,8	0,232	26,3	0,208	64,3
13	-4,40	0,248	17,6	0,222	20,7	0,205	59,2
14	-4,50	0,240	14,6	0,214	16,9	0,202	54,6
15	-4,60	0,234	12,6	0,208	14,4	0,198	49,1
16	-4,70	0,230	11,5	0,198	10,8	0,196	46,3
17	-4,80	0,226	10,4	0,193	9,38	0,193	42,6
18	-4,90	0,222	9,37	0,188	8,02	0,191	40,3
19	-5,00	0,219	8,65	0,184	7,06	0,188	37,0
20	-5,25	0,214	7,51	0,182	6,54	0,184	32,6
21	-5,50	0,208	6,35	0,179	6,01	0,179	27,9
23	-6,00	0,198	4,71	0,176	5,43	0,172	22,1
24	-6,50	0,193	4,00	0,173	4,89	0,166	18,0
25	-7,00	0,188	3,38	0,167	3,91	0,161	15,1
26	-7,50	0,184	2,95	0,161	3,11	0,158	13,4
27	-8,00	0,179	2,46	0,157	2,65	0,153	11,0
28	-8,50	0,176	2,20	0,153	2,23	0,150	9,68
29	-9,00	0,173	1,96	0,149	1,87	0,148	8,90
30	-9,50	0,170	1,75	0,142	1,38	0,146	8,19
31	-10,0	0,167	1,54	0,134	0,90	0,144	7,55
32	-10,5	0,164	1,36	0,128	0,67	0,142	6,84
33	-11,0	0,161	1,18	0,122	0,44	0,140	6,24
34	-12,0	0,157	1,00	0,113	0,24	0,136	5,15
35	-13,0	0,153	0,83	0,104	0,11	0,132	0,20
36	-14,0	0,149	0,67	0,098	0,062	0,129	0,60
37	-16,5	0,142	0,48	0,096	0,051	0,122	2,44
38	-19,0	0,134	0,29	0,094	0,040	0,116	1,69
39	-21,5	0,128	0,21	0,090	0,027	0,112	1,30
40	-24,0	0,122	0,13	0,086	0,013	0,107	0,91
41	-29,0	0,113	0,060	0,080	0,0047	0,098	0,43
42	-34,0	0,104	0,023	0,077	0,0025	0,092	0,24
43	-39,0	0,098	0,011	0,071	0,00041	0,088	0,15
44	-44,0	0,094	0,0056	0,068	0,00011	0,083	0,82
45	-49,0	0,090	0,0033	0,067	0,000073	0,079	0,04
46	-54,0	0,086	0,0010	0,066	0,000037	0,075	0,22
47	-59,0	0,083	0,00024	0,064	0,000023	0,072	0,12

Продолжение табл. 4

№ пп.	р, м вод. ст. $\approx 10^4$ Па	5 почва		6 почва		7 почва	
		W вес, г/г	k вл, мм/сут	W вес, г/г	k вл, мм/сут	W вес, г/г	k вл, мм/сут
48	—64,0	0,080	0,00017	0,063	0,000010	0,70	0,0074
49	—69,0	0,078	0,00010	0,062	0,0000045	0,067	0,0033
50	—74,0	0,077	0,000040	0,062	0,0000045	0,064	0,0011
51	—84,0	0,071	0,000013	0,060	0,0000009	0,61	0,0004
52	—94,0	0,068	0,000007	0,058	0,0000004	0,057	0,00007

один массив — их алгебраическую сумму. Физически это есть величина поступления влаги к поверхности почвы. Разумеется, поступление, имеющее отрицательную величину — это испарение.

Вот основные массивы вводимые в ЭВМ:

- а) массив давлений (табл. 4, 5);
- б) массив влажностей;
- в) массив влагопроводностей;
- г) массив глубины залегания уровня грунтовых вод;
- д) массив поступления воды к поверхности почвы;
- е) массив начальных давлений.

Первые три массива представляют собой физические характеристики почвы. Давление, имеющее определенный номер в первом массиве, соответствует влажности, имеющей этот же номер во втором массиве, а также влагопроводности — в третьем массиве.

Если задаются гидрофизические характеристики *двух* слоев почвы, то этих массивов будет уже не три, а шесть (на самом деле — пять!).

Совершенно аналогично соответствующие друг другу числа в массивах «г» и «д» — это уровень грунтовых вод и поступление воды к поверхности почвы в течение *одного и того же* календарного периода (например, суток). Иногда к этим двум массивам добавляется еще дополнительный, в котором указаны дата и час, соответствующие величинам в массивах «г» и «д».

Таблица 5

Массивы гидрофизических характеристик, Казахстан;
ОГХ определена по методике, описанной в разделе 7 главы 1;
влагопроводность вычислена по формуле А. И. Будаговского [9].
Аналитики: М. Н. Басмановская и Л. Л. Журавлева

№ пп.	р, м вод. ст. $\approx$ $\approx 10^4$ Па	9—10 почва		11 почва		12 почва	
		W вес, г/г	k вл, м/сут	W вес, г/г	k вл, м/сут	W вес, г/г	k вл, м/сут
1	0,00	0,329	0,0117	0,243	0,0183	0,212	0,0211
2	—0,5	0,328	0,0115	0,243	0,0183	0,212	0,0211
3	—1,0	0,326	0,0112	0,243	0,0183	0,212	0,0211

№ III	Р, м вод. ст. ~ 10 ⁴ Па	9—10 почва		11 почва		12 почва	
		W вес. г/г	k вл. м/сут	W вес. г/г	k вл. м/сут	W вес. г/г	k вл. м/сут
4	—1,5	0,325	0,0110	0,243	0,0183	0,211	0,0206
5	—2,0	0,324	0,0107	0,242	0,0176	0,211	0,0206
6	—2,5	0,322	0,0105	0,242	0,0178	0,211	0,0206
7	—3,0	0,321	0,0102	0,242	0,0178	0,211	0,0206
8	—3,5	0,320	0,0100	0,242	0,0178	0,210	0,0201
9	—4,0	0,319	0,00975	0,242	0,0178	0,210	0,0201
10	—4,1	0,318	0,00951	0,242	0,0178	0,210	0,0201
11	—4,20	0,310	0,00839	0,242	0,0178	0,210	0,0201
12	—4,30	0,302	0,00727	0,242	0,0178	0,210	0,0201
13	—4,40	0,296	0,00647	0,242	0,0178	0,205	0,0179
14	—4,50	0,292	0,00600	0,238	0,0163	0,202	0,0166
15	—4,60	0,288	0,00555	0,236	0,0156	0,198	0,0150
16	—4,70	0,284	0,00510	0,232	0,0142	0,196	0,0143
17	—4,80	0,281	0,00481	0,229	0,0133	0,193	0,0133
18	—4,90	0,277	0,00441	0,226	0,0124	0,191	0,0126
19	—5,00	0,272	0,00396	0,222	0,0113	0,188	0,0116
20	—5,25	0,265	0,00343	0,216	0,00972	0,184	0,0103
21	—5,50	0,258	0,00289	0,209	0,00813	0,179	0,00904
22	—5,75	0,253	0,00258	0,206	0,00742	0,176	0,00816
23	—6,00	0,248	0,00226	0,202	0,00672	0,172	0,00728
24	—6,50	0,240	0,00185	0,195	0,00549	0,166	0,00605
25	—7,00	0,234	0,00157	0,190	0,00473	0,161	0,00518
26	—7,50	0,228	0,00133	0,186	0,00420	0,158	0,00467
27	—8,00	0,223	0,00115	0,182	0,00370	0,153	0,00394
28	—8,50	0,219	0,00102	0,179	0,00335	0,150	0,00352
29	—9,00	0,215	0,000900	0,176	0,00305	0,148	0,00328
30	—9,50	0,212	0,000819	0,175	0,00275	0,146	0,00304
31	—10,0	0,210	0,000770	0,170	0,00247	0,144	0,00282
32	—10,5	0,207	0,000690	0,168	0,00231	0,142	0,00261
33	—11,0	0,204	0,000620	0,166	0,00214	0,140	0,00241
34	—12,0	0,200	0,000540	0,162	0,00184	0,136	0,00204
35	—13,0	0,196	0,000470	0,159	0,00165	0,132	0,00173
36	—14,0	0,192	0,000400	0,157	0,00151	0,129	0,00150
37	—16,5	0,186	0,000318	0,150	0,00119	0,122	0,00115
38	—19,0	0,179	0,000236	0,144	0,00087	0,116	0,00080
39	—21,5	0,174	0,000193	0,139	0,00070	0,112	0,00064
40	—24,0	0,169	0,000149	0,134	0,00053	0,107	0,00048
41	—29,0	0,161	0,000097	0,126	0,00035	0,098	0,00027
42	—34,0	0,152	0,000057	0,119	0,00022	0,092	0,00017
43	—39,0	0,146	0,000039	0,114	0,00016	0,088	0,00013
44	—44,0	0,140	0,000025	0,108	0,00010	0,083	0,000082
45	—49,0	0,137	0,000020	0,104	0,000076	0,079	0,000059
46	—59,0	0,134	0,0000155	0,100	0,000052	0,075	0,000035
47	—59,0	0,129	0,0000095	0,096	0,000035	0,072	0,000025
48	—64,0	0,123	0,0000052	0,091	0,000020	0,070	0,000019
49	—69,0	0,120	0,0000035	0,088	0,000014	0,066	0,000013
50	—74,0	0,116	0,00000211	0,084	0,0000080	0,064	0,000008
51	—84,0	0,111	0,00000097	0,079	0,0000035	0,061	0,0000046
52	—94,0	0,106	0,00000034	0,074	0,0000013	0,057	0,0000019
53	—104	0,102	0,00000013	0,071	0,0000006	0,055	0,0000011
54	—108	0,100	0,00000005	0,070	0,0000005	0,052	0,0000009

Контроль массивов исходных данных

Опечатки возникают при переписывании исходных данных, при их перфорации, при вводе в ЭВМ. Наконец, первоисточник исходных данных сам может содержать опечатки.

Чрезвычайно важно наладить внимательный контроль и выявление этих помех.

Некоторую помощь в этом оказывают стандартные методы контроля, принятые в вычислительной математике. Например, принято, помимо массива чисел, вводить в ЭВМ также их *контрольную сумму*. Суммируя массив и сравнивая его с контрольной суммой, ЭВМ выявляет некоторые опечатки.

Гидрометеорологические таблицы обычно содержат среднедекадные, среднемесячные и среднегодовые величины. Эти данные надо вводить в ЭВМ и использовать для контроля. Поэтому желательно, чтобы «куски», которые считаются, состояли из *целых* декад, месяцев и лет, даже если расчет производится за более короткий период.

Описанные выше и подобные им формальные методы контроля не могут ликвидировать полностью некоторые источники помех, например опечатки в первоисточниках. Поэтому дополнительно надо всегда выводить на печать все исходные данные в виде таблиц и графиков. Каждый расчет должен начинаться с такой *распечатки*.

6. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

ЭЦВМ может выдавать рассчитанные величины в виде записей на магнитной ленте, перфокарт, отпечатанных таблиц, графиков и даже «телефильмов» на электронно-лучевой трубке.

Необходимо добиться, чтобы материалы расчета на каждый интервал (сутки) представляли собой прямоугольную аккуратную таблицу. Вверху таблицы должна быть напечатана дата и час, соответствующие данной выдаче. В первой колонке таблицы печатаются глубины от поверхности почвы; в следующих колонках — соответствующие им величины давлений, влажностей, потоков, влагозапасов. Вверху каждой колонки должно быть напечатано название величины и ее размерность. Впоследствии таблицы сшиваются.

Помимо таблиц необходим вывод ряда графиков, прежде всего *хроноизоплет*. Полезными оказываются хроноизоплеты влажности, давления, потоков влаги, скорости изменения влажности и многих других величин.

Построение хронологических графиков для отдельных слоев оказывается полезным только если этих слоев выбрано очень немного. Иначе получается путаница линий, разобраться в которой очень трудно. Опыт показывает, что полезно строить гра-

фик хода влагозапасов почвы во всей зоне аэрации, в полуметровом и метровом слоях. Для сопоставления с лизиметрическими наблюдениями строятся графики хода веса лизиметра, потоков и интегральных потоков на верхнем и нижнем торцах монолита.

Эпюры влажности и других величин также целесообразно строить только если на каждом графике их очень немного. Чрезвычайно легко организовать построение на АЦПУ ежедневных эпюр влажности (звездочками). На каждом графике должна быть только одна эпюра. Лента АЦПУ разрезается и с помощью скоросшивателя превращается в альбом. При необходимости сопоставления соответствующие листы альбома вынимаются и совмещаются на светокопировальном столе. Необходимо четкое обозначение даты на каждом графике.

Каждый из графиков должен иметь название, печатаемое самой ЭЦВМ, и размеченные оси координат с обозначением размерности. Часто полезны некоторые специальные графики, оформленные в соответствии с задачами расчета.

Кроме этих таблиц и графиков необходима выдача в конце каждого «куска» перфокарт с распределением давления. Эти перфокарты будут массивом начальных условий при расчете следующего куска.

Опыт показывает, что типичной ошибкой, которая всегда допускается административно-хозяйственным персоналом, является покупка ЭВМ без достаточного количества оконечных устройств. Как писал один из американских коллег, «благодаря выдающимся деловым качествам, проявленным бизнесменами, купившими ЭВМ для ВЦ нашего колледжа, графическая интерпретация результатов 6-часового расчета заняла два года».

В подобных условиях целесообразным оказывается вывод всех результатов расчета на магнитную ленту, барабаны, диски или перфокарты. В последующем эти данные используются для оформления результатов расчета, которое, вообще говоря, может проводиться на другой ЭЦВМ. Иногда записываются только результаты вычисления давления, а все остальные величины находятся в ходе оформления.

При проведении вычислений небольшими кусками на мини-ЭВМ часто нет смысла сразу строить графики. Удобнее организовать оформление с помощью специальной вспомогательной программы после того, как весь непрерывный период будет рассчитан.

Пока что ВЦ, оборудованный большим количеством совершенных графопостроителей, — скорее исключение, чем правило. Магнитная запись результатов расчета позволяет, пользуясь одним и тем же графопостроителем, последовательно строить все графики с помощью вспомогательных программ.

Если на ВЦ нет графопостроителей, хроноизоплеты можно строить с помощью обычного печатающего устройства (АЦПУ), имеющегося на каждой ЭЦВМ. За каждые сутки проводится ин-

терполяция между значениями влажности, вычисленными на заданных глубинах. Найденная координата влажности, соответствующей линии хроноизоплеты, отмечается на ленте в виде точки, звездочки или просто цифры (значения влажности). Двигаясь по оси времени, шаг за шагом получают очертания хроноизоплет.

Другой, более простой способ заключается в том, что на ленту наносится определенное количество значков, тем больше, чем выше влажность почвы. Более влажные области выглядят более темными. Производимое обычно для отчетно-проектных документов уменьшение иллюстраций с помощью фотографий или электрографии делает такие графики очень похожими на обычно применяемые хроноизоплеты со штриховкой. Каждый из таких графиков должен кончатся «обозначениями» с квадратами, дающими соотношение между плотностью штриховки и влажностью.

Наиболее наглядный результат дает совместное применение обоих способов.

Желательно на том же рисунке строить хронологические графики хода метеоэлементов, испарения, потока влаги через поверхность почвы, водообразования («стока») и уровня грунтовых вод. Иногда удобнее хронологические графики исходных данных строить отдельно, склеивая их затем с хроноизоплетами.

В обоих случаях необходимо, чтобы по оси времени были напечатаны даты.

Выдача графиков на электронно-лучевую трубку пока целесообразна только при расчетах на самых быстродействующих ЭЦВМ. Однако в будущем эта техника полностью заменит описанные выше простейшие приемы. Применяя совершенные *дисплеи*, целесообразно строить *цветные* хроноизоплеты, приписывая сухой почве *красный* цвет, а насыщенной — *синий*. Это соответствует старинной традиции почвоведов.

При образовании верховодки, лиманном орошении, впитывании воды в песок, подстилаемый суглинком, в зоне аэрации появляются области, в которых давление больше атмосферного. Для них отводится участок спектра от *синего* до *фиолетового* и черного. Это соответствует традициям гидрологов. Почвоведы раньше таких цветов не употребляли.

7. ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА

Сложив перфокарты, на которых заперфорирована рабочая программа, с перфокартами, на которых набиты исходные данные, получают колоду перфокарт. Вводят ее в ЭЦВМ. Через некоторое время ЭВМ начинает быстро печатать.

Вначале появляется отпечатанная сводка исходных данных. Затем на некоторое время выдача цифр прекращается. Можно использовать это «окно», чтобы бегло просмотреть исходные данные и убедиться, что все в порядке.

После этого ЭВМ начинает печатать результаты расчетов за

первый интервал, например за первые сутки. Потом опять следует период спокойствия, затем выдаются данные за вторые сутки, и т. д.

Желательно бегло просматривать выдаваемую машиной ленту, а также следить за продолжительностью интервала времени между двумя выдачами на печать. При обычно применяемом временном шаге в 0,5 ч суточные выдачи происходят: на мини-ЭВМ с быстродействием 10^3 операций в секунду — примерно через 10 минут, на средних ЭВМ с быстродействием 10^4 операций в секунду — через одну-две минуты.

При расчетах на мощных ЭВМ удобнее наблюдать за появлением результатов по ленте широкой печати, на которую выдаются хроноизоплеты и хронологические графики исходных данных. При некоторой практике возникает устойчивый навык почти мгновенного анализа и критического контроля моделируемого процесса.

Наблюдение за таблицами, выдаваемыми мощной ЭЦВМ, мало что даст: цифры появляются слишком быстро. Анализ их лучше проводить после окончания расчета.

Итак, расчет доведен до числа. Далее возможны два варианта.

1) наблюдений за водным режимом почвы в данном пункте нет. В этих случаях материалы расчета обычно используются для получения некоторых *вторичных* наблюдаемых или проектируемых величин;

2) наблюдения (хотя бы разрозненные) в данном пункте или вблизи него есть. Тогда проводится *сравнение* расчета с природой. И лишь затем вычисляются вторичные величины.

Техника такого сопоставления показана в следующей главе на конкретных примерах.

ГЛАВА 4

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТОВ С ПОЛЕВЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ

Любая теория лишь схематически изображает некоторые черты действительности. Законность применения любых уравнений для прикладных расчетов всегда сомнительна.

Применяя даже самые общие принципы, например законы Ньютона, мы большей частью *заранее* знаем, что существуют исключения.

Все, что можно потребовать, — это чтобы в *большинстве* случаев метод расчета давал ошибки, лежащие в заданных пределах.

Даже если техника расчетов безупречна, никогда нельзя гарантировать заранее достоверность получаемых результатов. Несовершенство самой модели и исходных данных могут свести на нет строгость и изящество математического аппарата.

Важность *массовых* проверочных расчетов и детального сопоставления их с натурой невозможно переоценить. Чем больше проведено таких сравнений, тем больше уверенность в достоверности всех элементов расчетной схемы.

В идеале мы должны применять любую теорию миграции влаги только к опытам в бронированном, идеально изолированном ящике, внутри которого убито все живое. Обнаружение существенных расхождений очень ценно для выявления *истинных* пределов применимости модели. А они всегда значительно шире, чем предполагается.

В течение последних десяти лет было проведено весьма много проверочных расчетов по описанной выше методике. Результаты систематически сопоставлялись с *полевыми* наблюдениями за влагопереносом.

Сравнения были осуществлены для почв различного гранулометрического состава от песчаных до суглинистых и торфяных. Регионы, где проводились такие сравнения, также были весьма разнообразны: Кавказ, Средняя Азия, Нечерноземная полоса РСФСР, Белоруссия, Сибирь и др.

К сожалению, объем книги не позволяет подробно описать все эти исследования. Графики, приведенные в этой главе, подобраны так, чтобы показать только *методику* сопоставления, технику «примерки».

В некоторой степени иллюстрируются также возможности, открывающиеся благодаря применению ЭЦВМ в расчетах водного режима зоны аэрации.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОДНОГО ИЗ РАЙОНОВ И МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ*

Расчеты движения влаги в зоне аэрации были проведены для полей колхоза им. М. В. Фрунзе Джамбульской области в Казахстане (в пределах Таласской орошаемой системы) за 1967—1970 гг. В данном районе в эти годы проводились комплексные водобалансовые исследования экспедиции Государственного гидрологического института.

Таласская оросительная система расположена на предгорной равнине, морфологически относящейся к территории конуса выноса реки. В гидрогеологическом отношении наиболее характерным явлением следует считать наличие мощного (до 90 м) водоносного горизонта, водовмещающими породами для которого служат гравийно-галечниковые отложения с супесчаным и песчаным заполнителем. Этот водоносный горизонт залегает глубже 2,5—3,0 м. Коэффициент фильтрации его около 30—40 м/сут.

Почвы рассматриваемой территории луговые и лугово-сероземные, в механическом отношении представлены суглинками легкими и средними. Массив вытянут с юга на север, уклон поверхности 0,006—0,008.

Водоподача на орошаемый массив площадью 310 га осуществляется из канала пропускной способностью до 0,7 м³/с. Полив производится напуском путем создания перемычек во временных оросителях.

Профилирующими культурами являются зерновые и сахарная свекла, занимающая 17% территории.

Состав культур на экспериментальных полях приведен в табл. 6.

Таблица 6

Расположение культур на экспериментальных полях

Поле	Год			
	1967	1968	1969	1970
I	Яровая пшеница	Сахарная свекла		
II III	Люцерна Свекла	Кукуруза	Сахарная свекла	

Согласно программе комплексных воднобалансовых исследований измерялись все элементы водного и теплового баланса и изучались:

1) метеорологический режим в богарных условиях и микроклимат орошаемого поля;

* Более полные сведения приведены в работе С. И. Харченко [89].

- 2) тепловой баланс подстиляющей поверхности;
- 3) приток и сброс оросительных вод;
- 4) суммарное и непродуктивное испарение и вертикальный влагообмен в зоне аэрации, испарение с водной поверхности;
- 5) режим грунтовых вод;
- 6) влажность корнеобитаемого слоя и зоны аэрации в режимных почвах и в связи с аккумуляцией влаги в период поливов;
- 7) водно-физические константы почвогрунтов;
- 8) минерализация оросительных, сбросных и грунтовых вод и солевой состав почвогрунтов;
- 9) динамика растительной массы.

Измерение перечисленных элементов водного и теплового баланса производилось круглосуточно по стандартной методике, принятой на сети гидрометслужбы, с соблюдением регламентирующих требований и учетом специфики в данном районе [89].

1. Измерялись температура и влажность воздуха, скорость ветра, давление, осадки, температура почвы на различных глубинах, продолжительность солнечного сияния по гелиографу в 1, 7, 13 и 19 ч среднесолнечного времени.

2. Теплобалансовыми наблюдениями фиксировались суммарная радиация, радиационный баланс, эффективное излучение, теплоток в почву в сроки 0, 6, 9, 12, 15 и 18 ч среднесолнечного времени.

3. Приток и сброс оросительных вод измерялись в стандартных гидрометрических лотках, водосливах и временных створах, оборудованных самописцами уровня воды «Валдай».

4. Измерялись суммарное и непродуктивное испарение и вертикальный влагообмен в зоне аэрации в лизиметрах ГР-80 с уровнем грунтовых вод $\xi = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ и $2,5$ м, заряженных почвогрунтом с ненарушенной структурой. Лизиметры взвешивались на платформенных весах один раз в 10 дней. Расход влаги в зону аэрации в лизиметрах и гидравлических испарителях, а также суммарное испарение в последних измерялись ежедневно в 7 и 19 ч. Испарение вычислялось по формуле:

$$E = X + M + R - I - \Delta W, \quad (4.1)$$

где X — осадки; M — полив; R — расход грунтовых вод в зону аэрации (долив); I — инфильтрация (откачка); ΔW — изменение влагозапасов, фиксируемое путем взвешивания лизиметров.

5. Уровни грунтовых вод измерялись по 13 скважинам в период поливов ежедневно, а межполивной — один раз в 3 дня, в невегетационный — один раз в 10 дней. Отдельные скважины оборудовались самописцами «Валдай».

6. Влажность почвогрунтов в слое 0—150 см измерялась термостатно-весовым методом ежедекадно в 4—5 точках, расположенных в центре поля и по его углам*. Бурение до грунтовых

* Площадь каждого поля около $0,6 \text{ км}^2$.

под производилось в одной точке у лизиметрической площадки и последний день каждого месяца; кроме того, производились измерения влагозапасов до полива и после.

7. Для каждого поля были выполнены измерения водно-физических констант — ПВ, ОВ, УВ, ВЗ, МГ, ММВ и выборочно НВ [74]. Некоторые данные о константах исследованных почв приведены в табл. 7. Отобраны монолиты для определения ОГХ и влагопроводности.

Таблица 7

Некоторые гидрофизические свойства почв орошаемого массива

Поле	Номер почвы	Коэффициент фильтрации, м/сут	Глубина слоя почвы, см	Плотность сухой почвы, г/см ³	Полная влагоемкость, % от массы сухой почвы	Наименьшая влагоемкость, % от массы сухой почвы	Влажность завядания, % от сухой почвы	Механический состав почвы (по Н. А. Качинскому)
I	5	0,05	0—60	1,26	30,2	24,6	8,6	Суглинок тяжелый иловато-пылеватый, крупнопылеватый
I	6	0,06	60—150	1,53	27,2	21,5	7,1	Суглинок средний иловато-крупнопылеватый
I	7	0,07	150 и до УГВ	1,76	21,2	17,0	4,7	Суглинок легкий песчаный
II	9—10	0,01	0—100	1,43	32,9	22,7	8,8	Суглинок тяжелый иловато-пылеватый, крупнопылеватый
II	11	0,02	100—150	1,53	24,3	21,4	5,7	Суглинок средний иловато-крупнопылеватый

2. ИЗМЕРЕННЫЕ И ВЫЧИСЛЕННЫЕ ЭПЮРЫ ВЛАЖНОСТИ

На первом этапе работ было проведено вычисление эпюр влажности и влагозапасов на Таласском орошаемом массиве, на поле I за 1967—1970 гг. и на поле II за 1969—1970 гг. (на поле II полный комплекс наблюдений проводился только с апреля 1969 г.).

Расчеты выполнялись по программам «Гидрофизика» [52, 53, 58, 69].

В ЭЦВМ в виде массивов чисел (таблиц) вводились следующие исходные данные:

- 1) коэффициент влагопроводности как функция влажности (см. табл. 4);
- 2) зависимость давления почвенной влаги от влажности (см. табл. 5);
- 3) ежедневные величины:
 - а) уровни грунтовых вод,
 - б) потока влаги через поверхность почвы;

4) распределение давления влаги по глубине почвы в начальный момент.

Подготовка массивов чисел исходных данных (таблиц) осуществлялась следующим образом.

1. Выбиралось 60 значений давления, лежащих в наиболее интересном для расчетов диапазоне. Для каждого значения вычислялся коэффициент влагопроводности.

2. Для этих же значений давления по измеренным в лаборатории ОГХ вычислялись соответствующие им влажности (объемные).

В профиле почвы были выделены три слоя, несколько отличающиеся по свойствам: 0—60 см, 60—150 см, 150—250 см.

3. Задаются массивы ежедневных значений:

а) уровня грунтовых вод — по материалам наблюдений;

б) потока влаги через поверхность почвы, вычисленных по формуле

$$f_1(t) = X + M - E; \quad (4.2)$$

ежедневные величины X и M — по материалам полевых наблюдений, E — по наблюдениям в лизиметрах с пересчетом или по одной из известных формул, используемых в гидрометеорологии. Хронологические графики массивов ежедневных значений за расчетные периоды показаны на рис. 6—8.

4. Массив начального распределения давления вычисляется по известной в начальный момент эпюре влажности с помощью зависимостей, изображенных на рис. 4, 5. Расчет проводился с шагом по глубине 0.1 м, по времени — 0,025 сут. На рис. 9—11 изображены измеренные и вычисленные эпюры влажности за каждый из периодов расчета по полям. По полю I расчетные периоды составили: за 1967 г. — 168 сут, 1968 г. — 96 сут, 1969 г. — 52 сут, 1970 г. — 26 сут.

Вычисленные и наблюдаемые эпюры влажности почвы близки. Различие этих эпюр объясняется тем, что точность полевых измерений влажности весовым методом существенно зависит от повторности наблюдений: фактически наблюдения дают нам только статистическую оценку эпюр влажности [14, 70, 74].

Удовлетворительное совпадение расчетов с измерениями могло бы показаться неожиданным. Используемая при расчетах модель не учитывает ряд факторов, оказывающих большое влияние на распределение влаги в почве: влияние гистерезиса, факторов, связанных с сильной нестационарностью процесса, влияние поглощения и переноса влаги корнями. В некоторых лабораторных исследованиях [8, 55, 74, 87] обнаружено, что результаты расчета распределения влаги в пористых средах по выбранному уравнению существенно отличаются от результатов ряда лабораторных опытов.

Фактически описываемые здесь расчеты проводились с целью обнаружения существенных расхождений с полевыми наблюде-

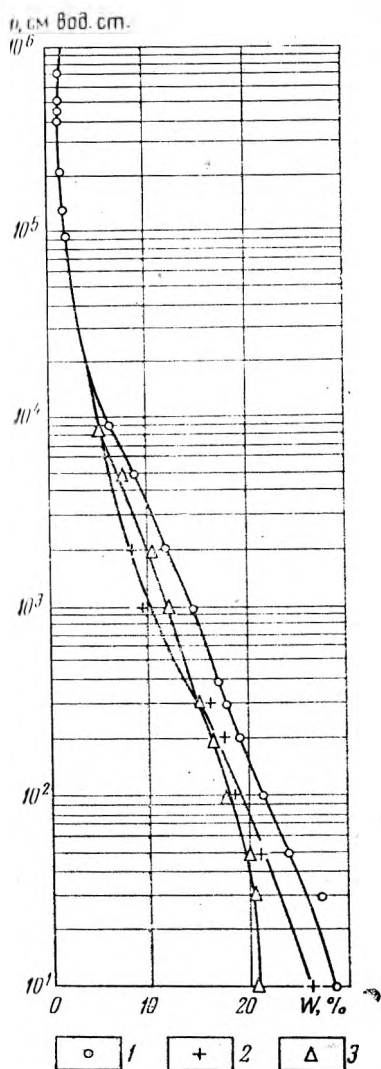


Рис. 4. Зависимости давления почвенной влаги от влажности почвы; с. Ново-Ивановка, поле I.

1 — почва № 6 (0—60 см); 2 — почва № 6 (60—150 см); 3 — почва № 7 (150 см — УГВ)

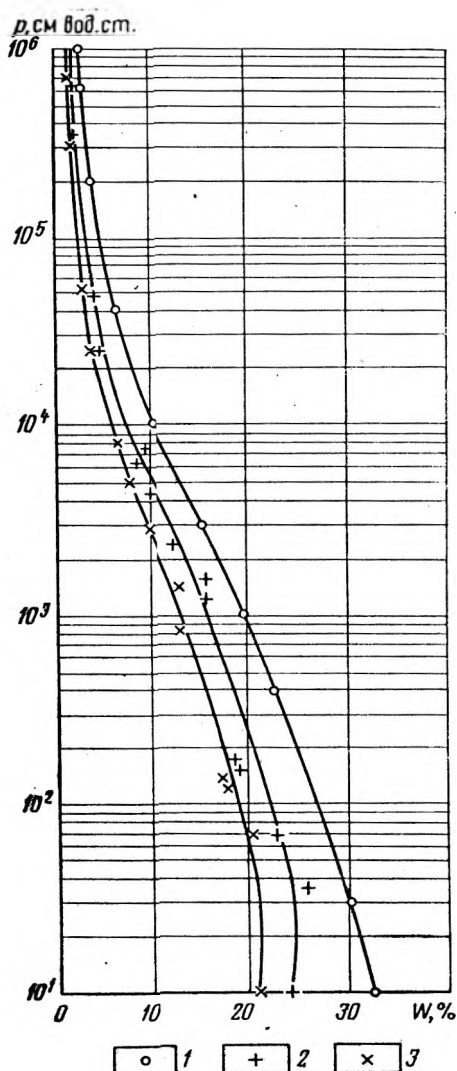


Рис. 5. Основные гидрофизические характеристики с. Ново-Ивановка, поле I.

1 — почва № 9—10 (0—100 см); 2 — почва № 100—150 см; 3 — почва № 12 (150 см — УГВ)

ниями и установления путей усовершенствования модели, наиболее важных для прикладных расчетов водного режима зоны аэрации. Однако выяснилось, что эти расхождения соизмеримы с точностью полевых измерений. По-видимому, главной причиной этого является весьма высокая (по сравнению с лабораторными опытами) погрешность полевых наблюдений. Как показал анализ литературных данных, расхождения теории с материалами лабораторных экспериментов лежат в пределах точности полевых измерений влажности при четырехкратной повторности.

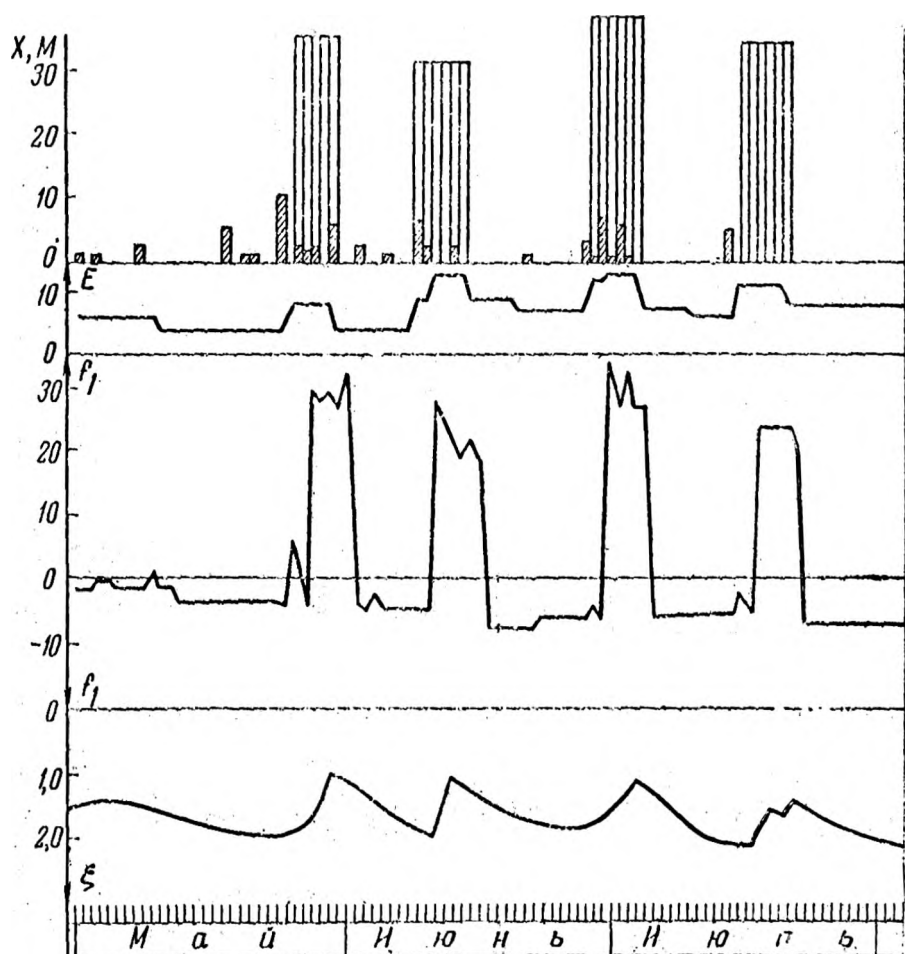


Рис. 6. Хронологический график хода метеоэлементов и уровня грунтовых вод за расчетный период с 30 апреля по 3 августа 1968 г. Поле I, Таласский орошаемый массив, Казахстан.

X — осадки (заштрихованы), M — поливы, мм/сут; E — испарение, мм/сут; f_1 — поступление влаги к поверхности почвы, мм/сут; ξ — уровень грунтовых вод от поверхности почвы, м

Отсутствие существенных расхождений, связанных с влиянием нестационарности, возможно, объясняется отсутствием на орошаемых землях условий, похожих на наблюдавшиеся в опытах М. Аллера [87]. Уровень грунтовых вод здесь довольно вы-

ток и, за исключением 1—2 дней после полива, влажность в верхних слоях почвы всегда меньше, чем в нижних. Следует отметить, что именно в течение этих 1—2 дней запрещается производить наблюдения за влажностью весовым методом, так как они дают неверные результаты из-за выжимания воды буром.

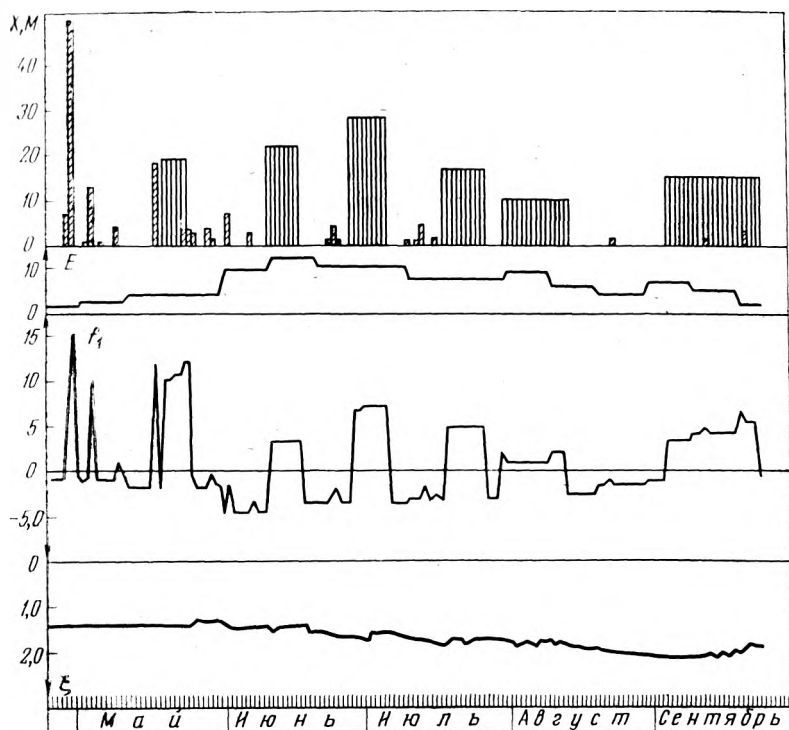


Рис. 7. Хронологический график хода метеозлементов и уровня грунтовых вод за расчетный период с 24 апреля по 10 октября 1967 г.

Условные обозначения те же, что и на рис. 6

Модель, описанная в главе 1, как будто бы не учитывает никаких параметров растительности, поэтому отсос влаги корневой системой может приводить к тому, что вычисленные влажности будут больше измеренных. В действительности принятая модель приближенно учитывает влияние растительности, так как в расчет вводится поток влаги через поверхность почвы. При вычислении этого потока, как указывалось выше, мы используем *измеренное в полевых условиях суммарное испарение*, основную часть которого составляет транспирация растительности. При такой постановке задачи роль корневой системы заключается в том,

что она уменьшает гидравлическое сопротивление почвы: корневые влагопроводы включаются параллельно потоку влаги в почве и действуют как шунт в электрической цепи. Гидравлическое сопротивление корневой системы значительно больше, чем влажной почвы, поэтому заметное влияние на влагоперенос корни могут оказывать только при низкой влажности почвы. В случае же орошаемого массива при высоком стоянии уровня грунтовых вод и высокой влажности почв вклад растительности в уменьшение гидравлического сопротивления почвы, по-видимому, не столь важен.

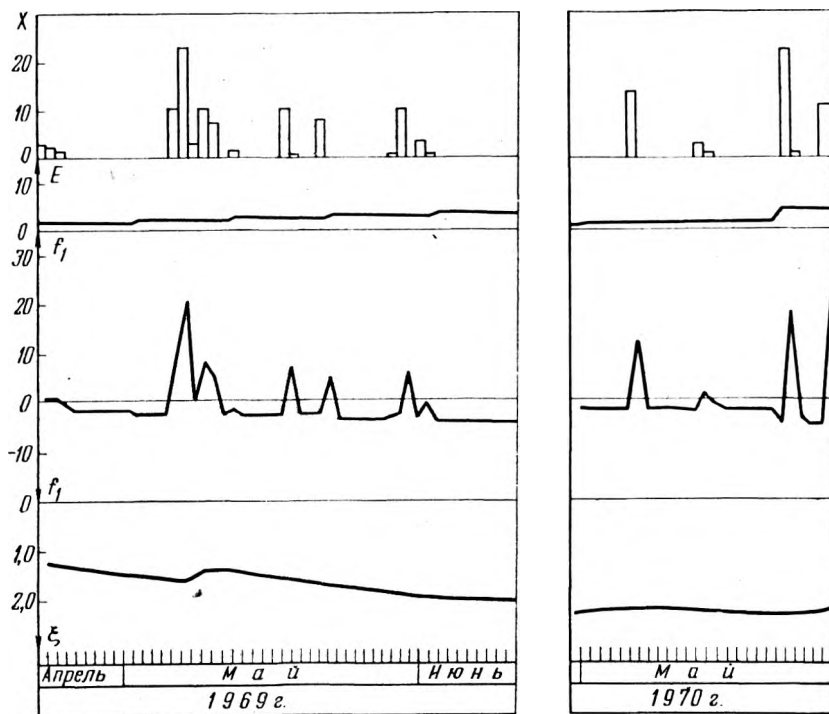


Рис. 8. Исходные данные за расчетные периоды: 22 апреля — 10 июня 1969 г., 30 апреля — 26 мая 1970 г. Поле I, Таласский орошаемый массив, Казахстан. Условные обозначения те же, что и на рис. 6

Из сказанного следует, что в исследованиях влияния корневой системы на влагоперенос в полевых условиях желательно использовать наблюдения в районах недостаточного увлажнения без орошения и в сухие годы. Тогда, возможно, удастся получить расхождения расчетных и наблюдаемых эпюр влажности, превышающие точность измерений.

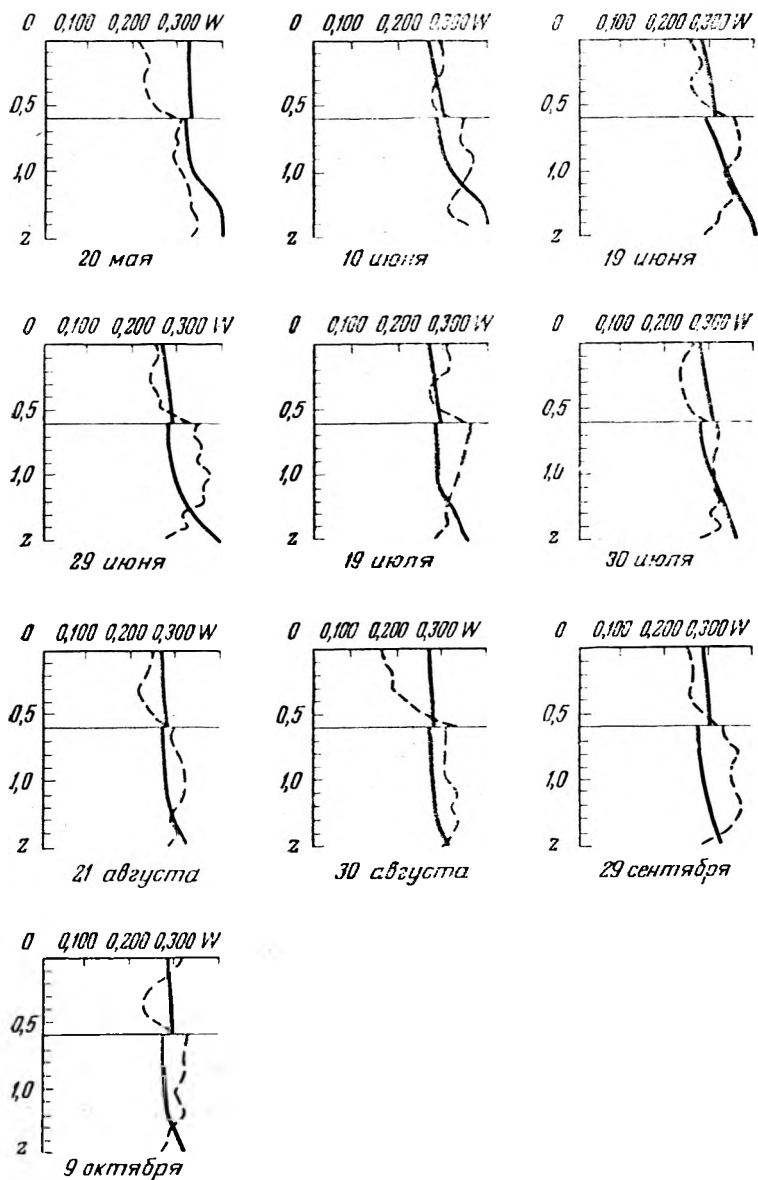


Рис. 9. Измеренные (сплошная линия) и вычисленные на ЭЦВМ (пунктирная линия) эпюры влажности почвы. Поле I, Таласский орошаемый массив, Казахстан, 1967 г.

В расчете заданы фиктивные начальные условия (влажность равна полной влагоемкости); видны систематические расхождения 20 мая, позже — влияние начальных условий компенсировалось. Горизонтальная линия — граница раздела слоев почвы

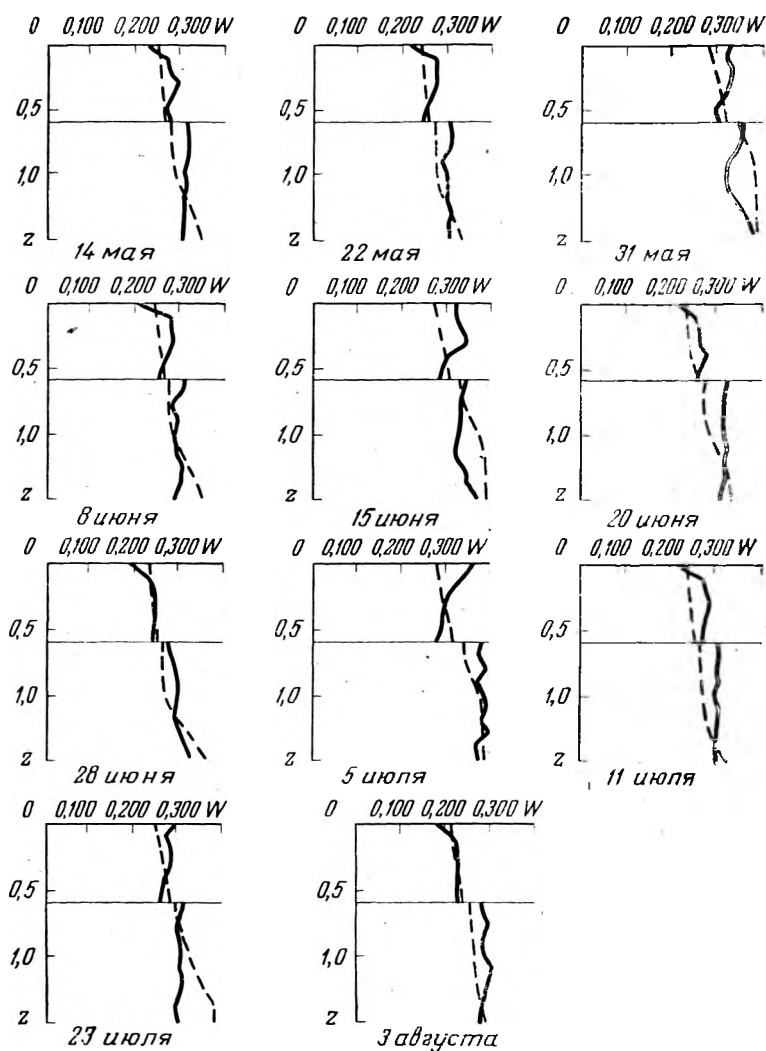


Рис. 10. Средние из четырех повторностей (сплошная линия) и рассчитанные на ЭЦВМ (пунктирные линии) влажности почвы. Поле I, Таласский орошаемый массив, Казахстан, 1968 г.

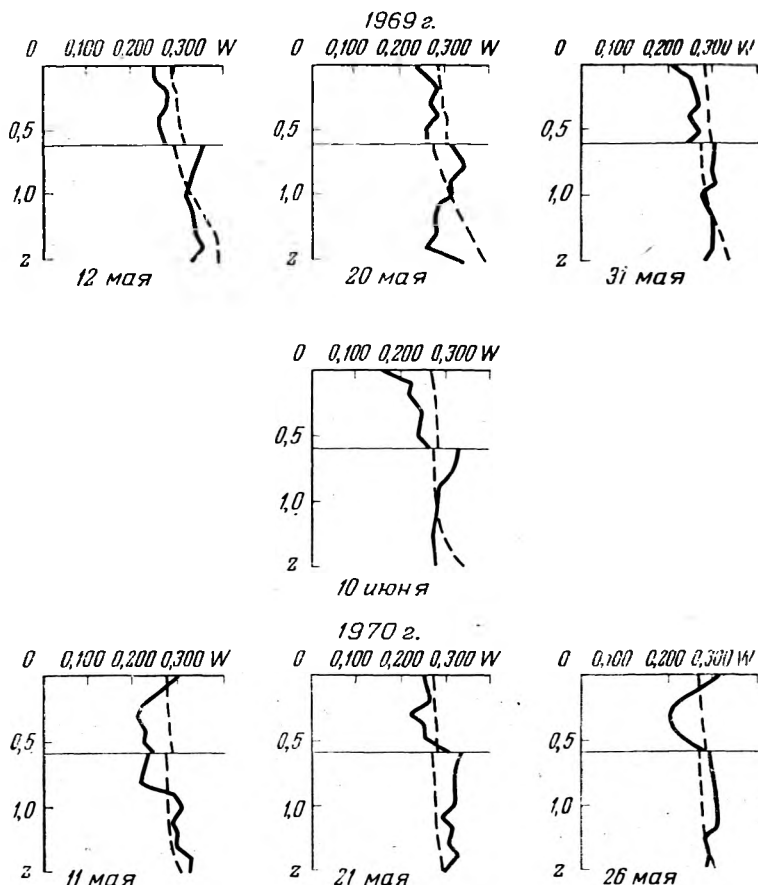


Рис. 11. Измеренные (сплошная линия) и вычисленные на ЭЦВМ (пунктирная линия) эпюры влажности почвы. Поле I, Таласский орошаемый массив, 1969 г. и 1970 г. Периоды расчета более короткие

3. ПРОСТЕЙШИЙ СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Измерение влажности в поле весовым методом дает величины, имеющие статистический характер [14, 70, 74], поэтому сравнение теории и опыта целесообразно проводить с помощью простейшего статистического аппарата.

Для оценки пространственной изменчивости влажности и влагозапасов на поле I было произведено несколько измерений (съемок) с 60-кратной повторностью (рис. 12).

Примем среднее из 60 повторностей за истинную величину влагозапасов и обозначим ее H_{60} . Тогда можно вычислить отклонение каждого из 60 измерений от H_{60} . Абсолютная величина та-

кого отклонения $\delta'H = H_1 - H_{60}$, где H_1 — влагозапасы, определенные с однократной повторностью, характеризуют ошибку измерения влажности в однократной повторности. Используя полученный таким образом ряд величин $\delta'H$, построим кривую обеспеченности величин $\delta'H/H_{60}$ по стандартной методике [74]. На

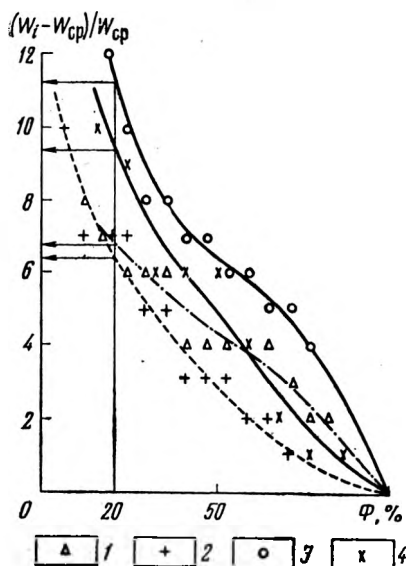


Рис. 12. Оценка точности измерений влагозапасов в четырехкратной повторности; за эталон принято определение в 60-кратной повторности (съемка). Слой 0—100 см.

Даты влагосъемок: 1 — 30—31/V 1969 г.; 2 — 14—15/XI 1969 г.; 3 — 21—22/VIII 1969 г.; 4 — 26—27/X 1970 г.

рис. 13 показаны такие кривые 2 для слоев почвы 0—100 см и 0—150 см.

Выделим из 60 точек измерений влажности во время съемки четыре точки. Найдем средние по этим четырем точкам влагозапасы H_4 . Тогда величина $\delta H = |H_4 - H_{60}|$ даст нам абсолютную величину отклонения измерения влажности в *четырёхкратной* повторности от «истинного» (H_{60}).

Выбирая каждый раз другие четыре точки, можно вычислить ряд величин $\delta H/H_{60}$ и затем построить кривую обеспеченности величин $\delta H/H_{60}$. Эта кривая обеспеченности характеризует возможные ошибки измерения влагозапасов в *четырёхкратной* повторности. На рис. 13 показаны такие кривые обеспеченности 3 для слоев почвы 0—100 см и 0—150 см. Естественно, что они лежат *ниже* кривых 2, потому что измерение с *четырёхкратной* пов-

торностью дает более точные результаты, чем с однократной.

Определение влажности с *бóльшой* повторностью (съемки) было проведено в разные моменты теплового периода года. Сравнение кривых обеспеченности показывает, что хотя в разные сезоны года графики несколько отличаются, общий характер их сохраняется. Как видно из рис. 12, в 80% случаев относительная ошибки измерений меньше 6—12%.

Выше мы говорили об ошибке *измерений* влажности. Будем теперь искать относительное отклонение *вычисленных* величин от измеренных.

Обозначим абсолютную величину разности между вычисленными на ЭЦВМ влагозапасами $H_{\text{выч}}$ и измеренными H_4 через

$$\Delta H = |H_4 - H_{\text{выч}}|.$$

За каждую дату, указанную под эпюрами влажности на

рис. 9—11, можно найти ΔH для данного слоя почвы. Таким образом, получим ряд ΔH , характеризующий отклонение вычисленных величин от измеренных в четырехкратной повторности.

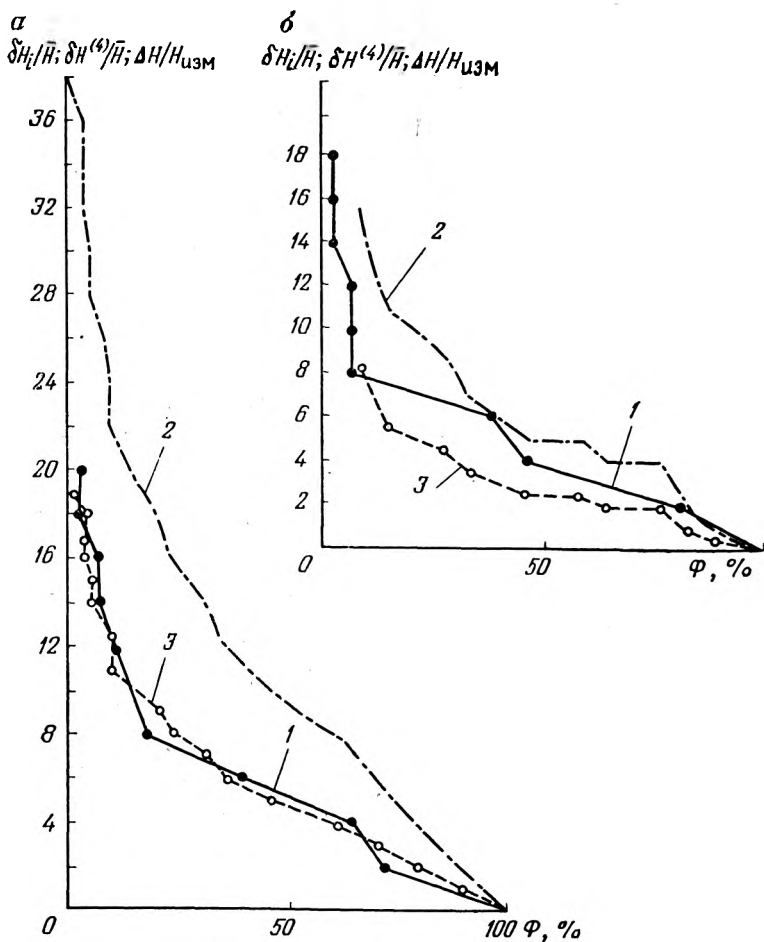


Рис. 13. Кривые обеспечения.

a — для слоя 0—100 см; *b* — для слоя 0—150 см.

Обеспеченность (вероятность превышения) расхождений между измеренными в четырехкратной повторности и вычисленными на ЭЦВМ (1). Для сравнения на этом же графике приведены: ошибка измерения в однократной повторности (2), оценка точности измерения в четырехкратной повторности 3

Кривая обеспечения 1 величин $\Delta H/H_4$ на рис. 13 характеризует относительную величину отклонений вычисленных величин от измеренных для слоя 0—100 см и 0—150 см.

Рассмотрим идеальный случай, когда расчет дает совершенно точные величины влажности. И в этом случае будут иметь место

отклонения вычисленных величин от измеренных в четырехкратной повторности, которые сами по себе не точны. Тогда кривая обеспеченности $\Phi(\Delta H/H_4)$ будет близка к кривой обеспеченности $\Phi(\delta H/H_{60})$, так как отклонения обусловлены исключительно точностью измерений.

Если расчет сам по себе имеет погрешность, и наблюдения, с которыми он сравнивается, также имеют некоторую ошибку, то эти ошибки будут накладываться. Тогда отклонение вычисленных от наблюденных будет больше, чем ошибка наблюдений. Это значит, что кривая $\Delta H/H_4$ будет лежать выше кривой $\delta H/H_{60}$ и тем выше, чем менее точен сам метод расчета.

Сравнение кривых $\Delta H/H_4$ и $\delta H/H_{60}$, построенных для различных слоев почвы данного района, показывает, что $\Delta H/H_4$ лежит несколько выше, но очень близко к кривой $\delta H/H_{60}$ и всегда много ниже кривых $\delta' H/H_{60}$. В качестве примера на рис. 13 проведено такое сравнение для метрового и полуметрового слоев.

Таким образом, влажность, рассчитанная на ЭЦВМ по данной модели, оказывается более точной, чем измеренная с однократной повторностью и почти столь же точной, как с четырехкратной повторностью.

Эти же выводы можно получить более простым путем, рассматривая (как это обычно делается в гидрологии) ошибку,

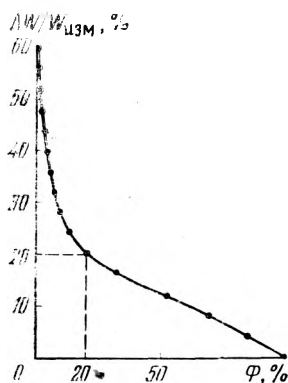


Рис. 14. Обеспеченность отклонений рассчитанных влажностей почвы от измеренных в четырехкратной повторности для слоев почвы в 10 см. Поле I, Таласский орошаемый массив, 1967 г.

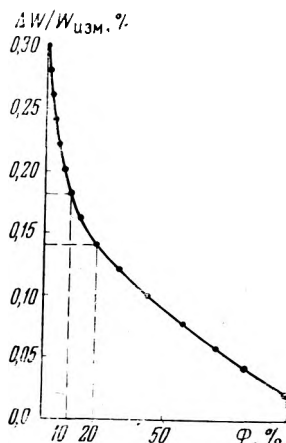
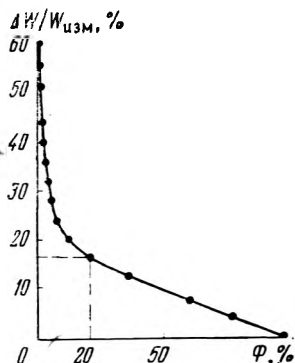


Рис. 15. Обеспеченность отклонений рассчитанных влажностей почвы от измеренных в четырехкратной повторности для слоев почвы в 10 см. Поле I, Таласский орошаемый массив, 1968 г. (Расхождения меньше показанных пунктирными прямыми бывают соответственно в 80% и 90% всех сравнений)

обеспеченную на 80%. Например, из рис. 14—16 видно, что расчет дает относительное отклонение от результатов четырехкратных наблюдений влажности в 80% случаев меньше 13—20% (для слоев почвы толщиной 10 см). Это очень близко к величине относительной ошибки измерения влажности при четырехкратной повторности [14, 70, 74]. В среднем в 80% случаев отклонение вычисленных значений от наблюдаемых меньше 13—15%, в то вре-

Рис. 16. Обеспеченность отклонений рассчитанных влажностей почвы от измеренных в четырехкратной повторности для 1967—1970 г., по обоим полям (см. рис. 14 и 15), для слоев почвы в 10 см. Для построения использованы все данные расчетов и наблюдений по Таласскому массиву за весь период наблюдений



мя как соответствующая ошибка измерений составляет по крайней мере 10%. Это показывает, что уже сейчас можно применять в мелиоративных, гидрологических и агрометеорологических исследованиях, изысканиях и проектировании мелиоративных систем расчетные значения влажности почвы в зоне аэрации в тех случаях, когда необходима точность, не превышающая ошибки определения влажности стандартным весовым методом с трех-четырёхкратной повторностью.

4. НАБЛЮДАЕМЫЕ И РАССЧИТАННЫЕ ПОТОКИ ВЛАГИ

С помощью алгоритма, описанного выше, мы можем рассчитать потоки в зоне аэрации на любой момент времени и на любой глубине. Сопоставление этих расчетов с опытными данными в значительной степени затруднено. Несмотря на то что существует довольно много предложений по конструированию приборов, которые должны позволить измерить поток влаги в любом слое зоны аэрации, до сих пор не создано надежного прибора или установки, показаниям которых можно полностью доверять. Например, конструкции ловушек, перехватывающих потоки влаги в зоне аэрации, обычно вносят столь сильные изменения в водный режим почвы, что полученные данные можно использовать только для грубых качественных исследований.

По-видимому, пока единственным надежным источником сведений о потоке воды через почву могут служить данные наблюдений в лизиметрах с подпиткой. Конечно, эти наблюдения дают возможность определять потоки влаги только на границе грунтовых вод и зоны аэрации, но зато с довольно высокой точностью.

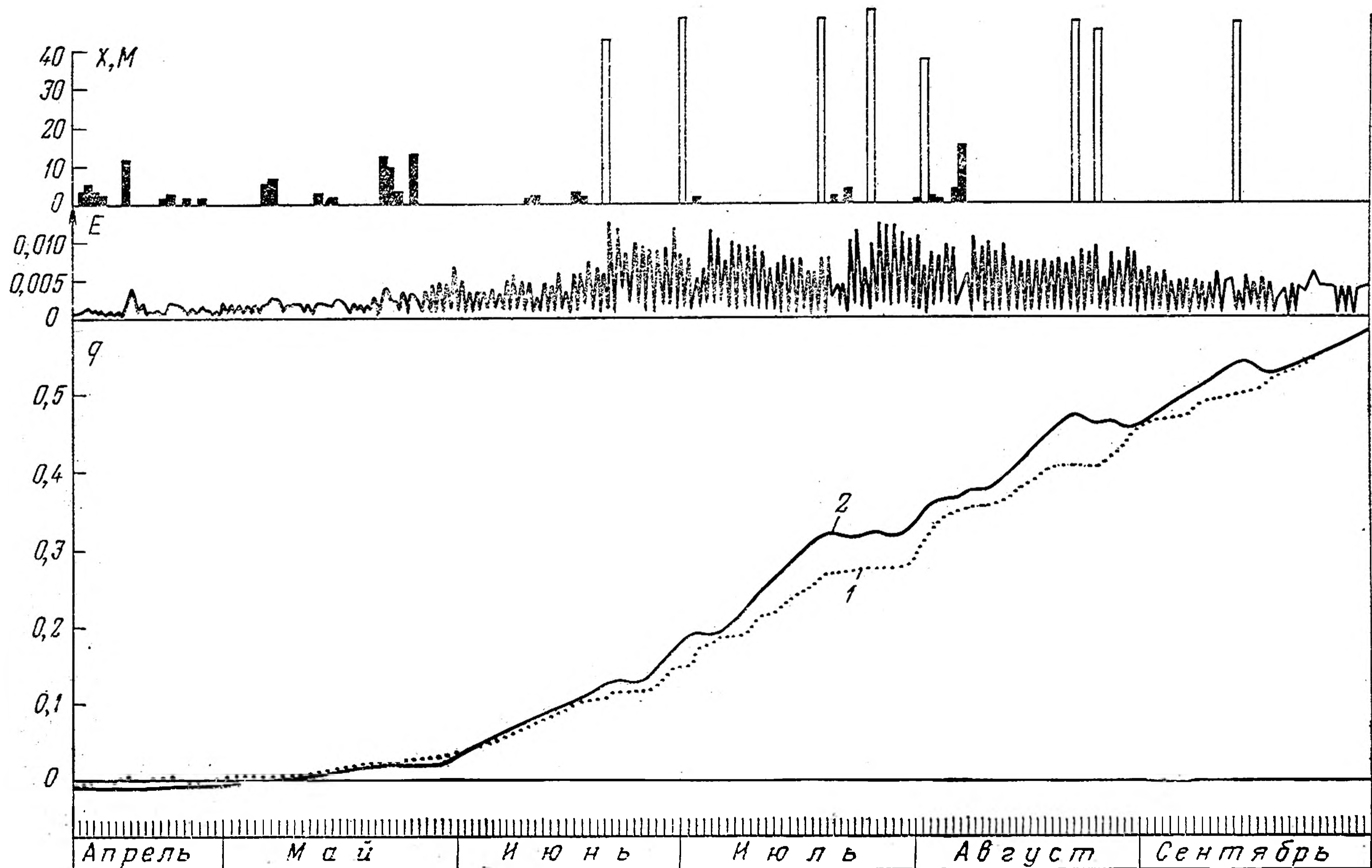


Рис. 17. Хронологический график для лизиметра ГПИЛ, 1970 г.

X, M - осадки, поливы, мм/сут; E - испарение, м/сут; q - суммарные от вегетационного периода потоки влаги (в м) на границе грунтовые воды - зона аэрации, измеренные в лизиметре (1) и вычисленные на ЭВМ (2)

В качестве примера сопоставления величин влагообмена зоны аэрации с грунтовыми водами, рассчитанного по разработанным алгоритмам, и наблюдаемого с помощью лизиметров по методике, описанной выше, на рис. 17 приведены расчетные 2 и измеренные 1 величины суммарных от начала вегетационного периода потоков влаги на границе грунтовые воды — зона аэрации [71, 81].

Исходные данные для такого расчета (осадки, поливы, испарение) приведены на этом же рисунке. Осадки измерялись осадкомером, поливы в лизиметре осуществлялись путем залива заданного количества воды; испарение измерялось тем же гидравлическим испарителем, в котором проводились наблюдения за влагообменом зоны аэрации и грунтовых вод. Глубина монолита лизиметра около 1,5 м, глубина залегания «грунтовых вод» поддерживалась постоянной на уровне 1,5 м от поверхности монолита.

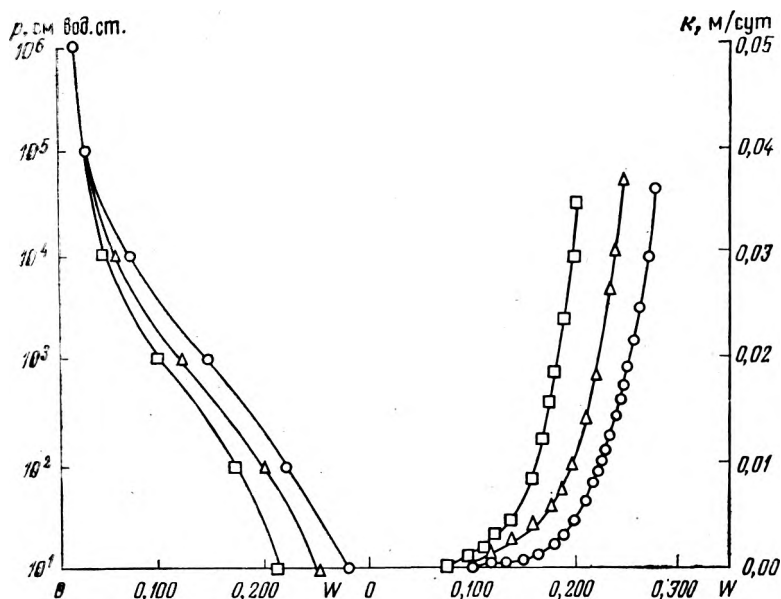


Рис. 18. Гидрофизические характеристики почвы, введенные в расчет (для трех слоев почвы)

Гидрофизические характеристики почвы, введенные в расчет, приведены на рис. 18. Зависимости потенциала почвенной влаги от влажности почвы для различных слоев определялись методом сенсора, а влагопроводность почвы вычислялась по формуле Аверьянова-Будаговского, причем в расчет вводился коэффици-

ент фильтрации, определенный для данной почвы экспериментально.

Подобные же расчеты были проведены для малых испарителей типа ГР-80. Глубина малых испарителей составляла от 0,5 до 2 м. Сопоставление величин потоков на дне лизиметров, измеренных и рассчитанных на ЭВМ, приведено на рис. 19.

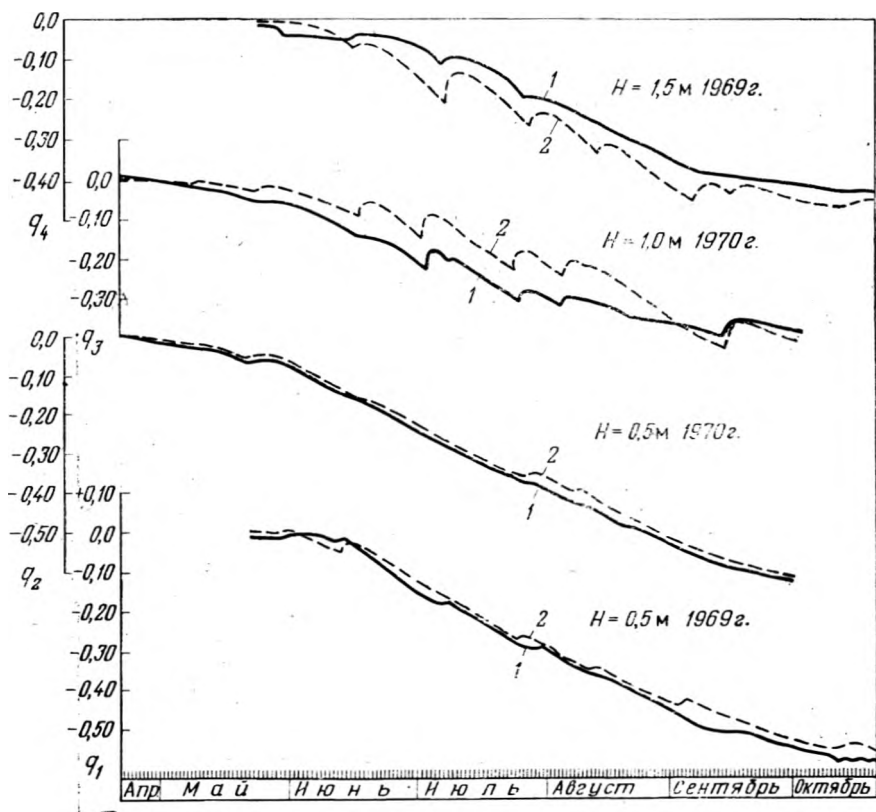


Рис. 19. Хронологический график хода суммарных от начала расчетного периода потоков влаги на границе грунтовые воды — зона аэрации, измеренных (1) и вычисленных на ЭЦВМ (2). H — глубины монолитов лизиметров

Как можно видеть, согласие между расчетными и измеренными величинами влагообмена зоны аэрации и грунтовых вод получается весьма удовлетворительным. Это указывает на то, что данный метод может оказаться весьма полезным для расчета потоков влаги в зоне аэрации, по крайней мере за достаточно большие интервалы времени.

5. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С БОЛЕЕ ТОЧНЫМИ НАБЛЮЖДЕНИЯМИ

После того как очень большое количество проверочных расчетов дали хорошее совпадение с наблюдениями в четырехкратной повторности, стали считать, что расчеты дают результаты *более точные*, чем измерения по стандартной методике, принятой на всей сети станций (т. е. весовым методом четырехкратные).

Но *расчет* не может быть точнее *опыта*. Поэтому вопрос в терминологии: что понимать под точностью опыта и наблюдения.

Весовой метод определения влажности — это метод *прямой*. Влагосодержание отобранных проб при достаточно тщательном взвешивании может быть определено как угодно точно.

Но измерения проводятся не для того, чтобы охарактеризовать влажность *проб*, а для анализа и расчета водного режима *некоторого участка, поля*.

Вследствие естественной вариации влажности в пространстве пробы недостаточно точно характеризуют режим всего участка. Поэтому, строго говоря, надо писать не о точности, а о *репрезентативности* (представительности) измерений влажности.

Используя эту терминологию, можно сказать, что расчет дает более репрезентативные результаты.

Пока такая терминология применяется мало. Обычно просто говорят о точности определения влажности в данной повторности [74].

Однако мало договориться о терминологии. Даже очень большое количество совпадений с четырехкратными наблюдениями не доказывает, что расчетный метод *точнее*.

Надо провести сравнение с более точными опытами и наблюдениями. Посмотреть, какое отклонение от них дает расчет. Сравнить эти расхождения с точностью измерения в разной повторности. Тогда можно говорить, что расчет дает результаты, сравнимые с точностью измерений в определенной повторности.

Эти сравнения надо вести на материале *полевых* опытов, так чтобы гидрометеорологический режим был достаточно разнообразен. Применялось четыре способа сравнения.

Первый способ заключается в сопоставлении результатов расчета с определениями влагозапасов в лизиметрах и испарителях [71]. Устройство и методика проведения опытов с этими приборами подробно описаны С. И. Харченко [89]. Для нас здесь важно только то, что они позволяют очень точно определять влагозапасы в монолите путем прямого взвешивания. В гидравлических (плавающих) лизиметрах-испарителях (ГПИЛ) взвешивание проводится ежедневно или даже ежечасно. Точность измерений довольно высока.

В табл. 8 приведены измеренные и вычисленные на ЭЦВМ влагозапасы в одном из лизиметров. Как можно видеть, совпадение получается далеко не идеальным, но довольно хорошим.

Таблица 8

Измеренные и вычисленные на ЭВМ запасы влаги в ГПИЛ;
 $H=1,5$ м; Таласский орошаемый массив, 1970 г.

№ пп.	Дата	Влагозапасы, мм		Отклонение	
		измеренные	рассчитанные	мм	%
	Апрель				
1	11	538	519	-19	-4
2	12	545	525	-20	-4
3	13	548	526	-22	-4
4	14	545	523	-23	-4
5	15	546	520	-26	-5
6	16	544	519	-25	-5
7	17	545	518	-27	-5
8	18	550	524	-26	-5
9	19	548	520	-28	-5
10	20	547	518	-29	-5
11	21	546	517	-29	-5
12	22	546	517	-29	-5
13	23	546	518	-28	-5
14	24	545	517	-28	-5
15	25	543	516	-27	-5
16	26	542	516	-26	-5
17	27	543	517	-26	-5
18	28	542	516	-26	-5
19	29	542	516	-26	-5
20	30	541	516	-25	-5
	Май				
21	1	541	518	-23	-4
22	2	539	518	-21	-4
23	3	538	517	-21	-4
24	4	537	516	-21	-4
25	5	536	516	-20	-4
26	6	544	525	-19	-3
27	7	543	523	-20	-4
28	8	542	521	-21	-4
29	9	542	520	-22	-4
30	10	541	518	-23	-4
31	11	538	517	-21	-4
32	12	537	516	-21	-4
33	13	537	517	-20	-4
34	14	537	518	-19	-4
36	16	535	516	-19	-4
37	17	534	516	-18	-3
38	18	532	515	-17	-3
39	19	532	515	-17	-3
40	20	531	514	-17	-3
41	21	529	513	-16	-3
42	22	545	530	-15	-3
43	23	546	528	-18	-3
44	24	543	522	-21	-4
45	25	540	518	-22	-5
46	26	548	525	-23	-4
47	27	545	521	-24	-4
48	28	541	516	-25	-5

№ пп.	Дата	Влагозапасы, мм		Отклонение	
		измеренные	рассчитанные	мм	%
49	29	537	512	—25	—5
50	30	534	510	—24	—5
51	31	528	506	—22	—4
	Июнь				
52	1	526	504	—22	—4
53	2	525	507	—18	—3
54	3	525	507	—18	—3
55	4	525	508	—18	—3
56	5	524	508	—16	—3
57	6	525	509	—16	—3
58	7	523	507	—16	—3
59	8	521	506	—15	—3
60	9	521	505	—16	—3
61	10	521	507	—14	—3
62	11	526	510	—16	—3
63	12	525	510	—15	—3
64	13	525	509	—16	—3
65	14	523	506	—17	—3
66	15	523	506	—17	—3
67	16	525	505	—20	—4
68	17	525	505	—20	—4
69	18	518	503	—15	—3
70	19	510	500	—10	—2
71	20	503	499	—4	—1
72	21	542	536	—6	—1
73	22	529	528	—1	0
74	23	517	518	—4	—1
75	24	505	501	—4	—1
76	25	495	495	0	0
77	26	490	492	—2	0
78	27	490	491	1	0
79	28	486	438	—2	0
80	29	480	484	4	1
81	30	476	485	9	2
	Июль				
82	1	516	537	21	4
83	2	528	536	8	2
84	3	528	523	—5	—1
85	4	518	507	—11	—2
86	5	509	496	—13	—2
87	6	502	492	—10	—2
88	7	493	489	—4	1
89	8	483	487	4	1
90	9	478	486	8	2
91	10	484	484	0	0
92	11	477	485	8	2
93	12	473	488	15	3
94	13	471	487	16	3
95	14	468	489	21	4

№ пп.	Дата	Влагозапасы, мм		Отклонение	
		измеренные	рассчитанные	мм	%
96	15	468	494	28	6
97	16	467	495	28	6
98	17	467	497	30	6
99	18	466	499	33	7
100	19	464	498	34	7
101	20	510	544	34	7
102	21	508	533	30	6
103	22	506	530	24	5
104	23	496	517	21	4
105	24	487	504	17	3
106	25	479	499	20	4
107	26	519	548	29	6
108	27	504	533	29	6
109	28	490	513	23	5
110	29	477	500	23	5
111	30	465	491	26	6
112	31	463	486	23	5
Август					
113	1	459	484	25	5
114	2	472	486	14	3
115	3	514	525	11	2
116	4	518	525	7	1
117	5	515	514	-1	0
118	6	500	504	-5	-1
119	7	513	509	-4	-1
120	8	524	522	-2	0
121	9	515	511	6	1
122	10	505	500	-5	-1
123	11	498	492	-6	-1
124	12	493	491	-2	-1
125	13	488	489	1	0
126	14	485	490	5	1
127	15	484	491	7	1
128	16	482	492	10	2
129	17	480	493	13	3
130	18	484	494	10	2
131	19	479	494	15	3
132	20	474	493	19	4
133	21	468	494	26	6
134	22	508	544	36	7
135	23	499	538	39	8
136	24	490	522	32	7
137	25	480	509	39	6
138	26	528	553	24	5
139	27	531	541	10	2
140	28	531	524	-7	-1
141	29	527	512	-15	-3
142	30	529	503	-26	-5
143	31	529	501	-28	-5

№ пп.	Дата	Влагозапасы, мм		Отклонение	
		измеренные	рассчитанные	мм	%
	Сентябрь				
144	1	527	500	-27	-5
145	2	522	500	-22	-4
146	3	517	499	-18	-3
147	4	513	500	-13	-3
148	5	509	500	-9	-2
149	6	506	500	-6	-1
150	7	507	501	-6	-1
151	8	508	502	-6	-1
152	9	505	502	-3	-1
153	10	500	501	1	0
154	11	497	500	3	1
155	12	496	501	5	1
156	13	544	556	12	2
157	14	540	543	3	1
158	15	536	529	-7	-2
159	16	540	519	-21	-4
160	17	542	513	-29	-5
161	18	543	512	-31	-6
162	19	543	512	-31	-6
163	20	542	509	-33	-6
164	21	543	508	-35	-6
165	22	541	508	-33	-6
166	23	537	506	-31	-6
167	24	533	506	-27	-4
168	25	529	506	-23	-5
169	26	524	506	-18	-3
170	27	520	507	-13	-2
171	28	516	507	-9	-2
172	29	512	507	-4	-1
173	30	508	507	-1	0

На рис. 20 показана статистическая обработка данных, приведенных в табл. 8. На рис. 20,а кривая I показывает относительное отклонение вычисленных влагозапасов от измеренных в лизиметре

$$\frac{\Delta W}{W_{\text{изм}}} = 100 \frac{|W_{\text{изм}} - W_{\text{выч}}|}{W_{\text{изм}}} \%,$$

На рис. 20,б приведена обработка съемок влажности (в 60-кратной повторности). Мы вычисляли по ним кривую обеспеченности ошибок однократных (кривая I), четырехкратных (кривая II) и восьмикратных (кривая III) определений

$$\frac{\delta W}{W_{\text{ср}}} = 100 \frac{|W_i - W_{60}|}{W_{60}} \%,$$

где W_i , W_{60} — средняя влажность полутораметрового слоя по результатам i -кратных ($i=1, 4, 8$) и 60-кратных наблюдений.

Сравнение кривой обеспеченности I на рис. 20,а и кривых

обеспеченности *I*, *II*, *III* на рис. 20,б может характеризовать величину отклонения расчета от измерений по сравнению с точностью (репрезентативностью) самих наблюдений весовым методом. Видно, что кривая *I* на рис. 20,а лежит вблизи и несколько ниже кривой *III* на рис. 20,б. Это говорит о том, что метод расчета дает погрешность примерно такую же, как наблюдения весовым методом в восьмикратной повторности.

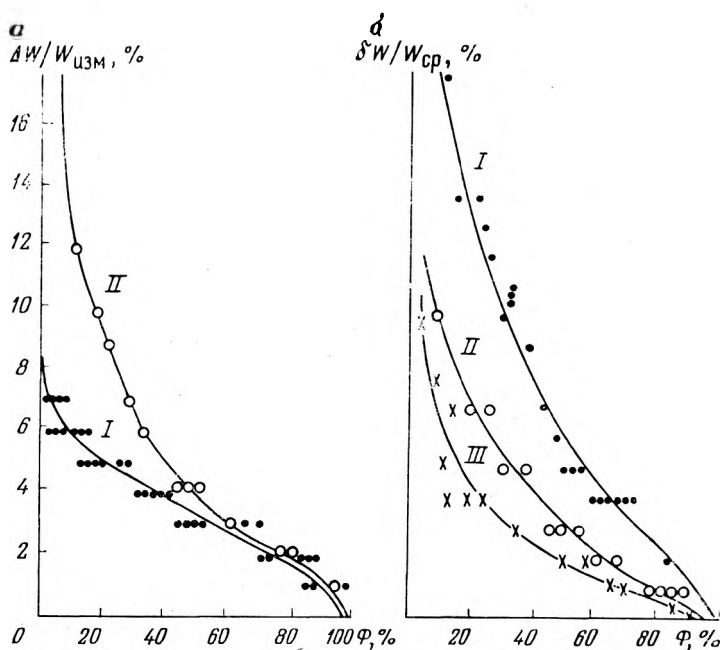


Рис. 20. Кривые обеспеченности Φ , % (вероятность превышения).

а — отклонений вычисленных средних влажностей от измеренных взвешиванием монолита лизиметра (*I*) и расхождение между вычисленными и измеренными в поле в четырехкратной повторности (*II*). *б* — точности (репрезентативности) измерений влажности в однократной (*I*), четырехкратной (*II*) и восьмикратной (*III*) повторности

Таким образом, точность (репрезентативность) расчетов на ЭВЦМ, действительно, несколько выше, чем точность наблюдений в четырехкратной повторности.

Чтобы проиллюстрировать это, был применен второй способ. На рис. 20,а нанесена кривая *II*. Это обеспеченность относительных отклонений вычисленных влагозапасов от измеренных в поле. Для построения этой кривой использованы результаты многочисленных расчетов на ЭВЦМ, аналогичные описанным в разделах 2 и 3. Рис. 20,а показывает, что с увеличением точности наблюдений значительно уменьшается расхождение между измеренными и вычисленными влагозапасами. Это также говорит о том, что расчет дает более точные (репрезентативные) данные, чем стандартные наблюдения в четырехкратной повторности.

Третий способ — это прямое сопоставление с наблюдениями за влажностью в 60-кратной повторности (съемками). Этих данных относительно немного. Но во всех случаях совпадение с 60-кратными наблюдениями лучше, чем с четырехкратными. Это также говорит о том, что по сравнению с четырехкратными наблюдениями расчет имеет некоторый «резерв» точности.

Четвертый способ анализа заключался в детальном сравнении расчета с эпюрами влажности в отдельных точках поля. Трудность здесь заключается в том, что для такого сравнения надо определить все исходные данные для этой же точки поля. Поэтому таких точек немного. Несколько увеличить их число можно, проводя сравнение расчета с *бурением монолитов лизиметров*, которое обычно показывает лучшее совпадение, чем при аналогичной повторности.

В качестве примера на рис. 21 приведены вычисленная (2) и измеренная (1) влажности в монолите лизиметра ГПИЛ при бурении. Замер проведен в двукратной повторности.

Совпадение вычисленной и измеренных значений влажности далеко не идеальное. Однако оно сравнимо с расхождением между двумя повторностями, отобранными в *одном и том же монолите*.

Приведенные здесь примеры не означают, что во всех случаях наблюдается идеальное совпадение расчета с наблюдением. В последующих главах будут приведены примеры значительных расхождений.

Однако в *большинстве* случаев результаты оказываются вполне удовлетворительными. Как мы увидим в следующей главе, расчет будет более репрезентативным, чем *стандартные* наблюдения не только в пространстве, но и *во времени*. Это позволяет рекомендовать данный или аналогичные методы расчета для массовой проверки и использования.

Можно надеяться, что простейшие методы сопоставления расчета с наблюдениями, описанные в данной главе, окажутся полезными в проведении этой работы.

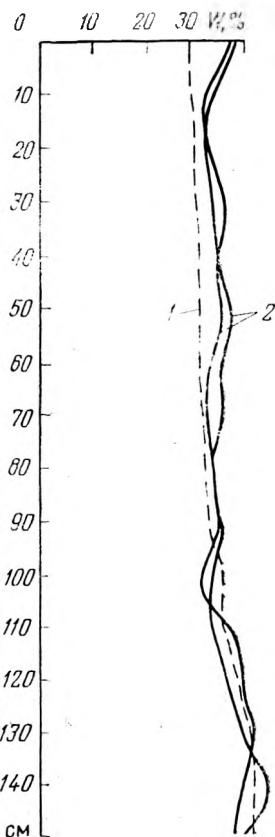


Рис. 21. Вычисленная (1) и измеренная (2) бурением в монолите лизиметра эпюры влажности на 17/IV

ГЛАВА 5

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Наблюдения, анализ и расчеты водного режима зоны аэрации проводятся в настоящее время очень большим количеством различных организаций. Но ни для одной из них данная работа не является основной. Более того, по-видимому, не существует ни одной постоянно действующей крупной лаборатории, которая бы занималась этим вопросом в течение хотя бы двадцати лет. Такие лаборатории и экспедиции организуются, но очень быстро меняют свою тематику.

Для агрономов эта работа имеет смысл только в плане увеличения урожайности, для мелиораторов — как средство обеспечить наилучший режим поливов, промывок... Гидрогеологи в основном интересуются питанием грунтовых вод из зоны аэрации. Географы и гидрологи занимаются этими вопросами как вспомогательными при расчетах стока и анализе эрозии почв. Почвоведы давно уже используют сведения о водном режиме зоны аэрации как средство объяснить генезис некоторых типов почв. Этими вопросами занимаются также строители, горные инженеры, метеорологи, бактериологи, специалисты по дорогам, лесоводы и многие другие.

Ясно, что для каждого специалиста возможности применения результатов расчетов будут различны.

В этой главе будут приведены только те возможности применения, которые могут быть полезны для тех, кто занимается водным режимом зоны аэрации. В основном обсуждается улучшение самой методики наблюдений, анализа и расчетов водного режима зоны аэрации.

1. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВОДНЫМ РЕЖИМОМ ПОЧВЫ

Создание метода, позволяющего вычислять все те характеристики водного режима зоны аэрации, которые сейчас обычно получают измерением, позволяет уменьшить объем наблюдений. При разумном применении расчетов на ЭЦВМ это улучшит количество и качество получаемой информации. Но ни в коем случае не означает, что нужно полностью прекратить все измерения.

Само понятие рационализации наблюдений предполагает просто усовершенствование их программы, с тем чтобы измерения проводились в оптимальные сроки на правильно спланированной сети пунктов.

Совершенно необходимо, чтобы все пункты, в которых имеются непрерывные ряды наблюдений длиной в 15 лет и более на одном и том же участке, продолжали давать информацию. Более того, необходимо некоторое увеличение объема работ в этих опорных точках.

Увеличится в основном объем камеральных работ. Необходимо наладить массовые определения гидрофизических характеристик почвы, необходимых для расчетов на ЭЦВМ. Придется также провести тщательное сопоставление расчетов с имеющимися рядами наблюдений, анализ и критический контроль.

Увеличится объем получаемой информации, а значит, и документации. Расчет на ЭЦВМ открывает возможность получения и публикации в ежегодниках *ежесуточных* таблиц влажности, влагозапасов и других характеристик водного режима. Это безусловно лучше, чем декадные таблицы с пропусками тех сроков, когда шел дождь. Они удобнее для проектировщиков, инженеров и даже для самих составителей.

Опыт такого рода есть у гидрологов: ежегодно составляются и публикуются таблицы ежедневных расходов воды в реках, хотя измерения проводятся очень редко. Эти таблицы обычно *вычисляются* по кривым расходов, после сравнения с немногими контрольными замерами.

При правильной организации все это не должно вызвать увеличения камеральных работ: вычисление и печатание полностью оформленных таблиц легко осуществляется самой ЭВМ.

Несколько уменьшится объем полевых работ. Отбор проб для определения физических свойств почвы сейчас все равно производится. Одновременное измерение гидрофизических характеристик почвы (ОГХ и влагопроводности) практически не приводит к существенному увеличению объема этих работ. Зато можно значительно уменьшить количество бурений на влажность весной, летом и осенью.

Так же как это делается при наблюдениях за движением воды в реках при *устойчивой* кривой расходов, вместо формальных декадных сроков наблюдения надо будет проводить так, чтобы захватить *экстремальные* моменты режима: сильную засуху, высокую влажность почвы и др.

По-видимому, имеет смысл применение на сети *режимных* станций новейших методов измерения влажности в моменты переувлажнения, когда весовой метод использовать нельзя.

В общем, наблюдения за водным режимом зоны аэрации больше станут похожи на научную работу. Появится возможность (и необходимость) внимательнее наблюдать за тем, что делается в природе.

Сеть без наблюдений

К сожалению, пока большая часть наблюдений за влагообменом в зоне аэрации производится не на режимных станциях и

постах. Более того, продолжительные систематические наблюдения на одном и том же участке проводятся редко. Только некоторые стоковые станции Гидрометслужбы, почвенные и гидрогеологические стационары имеют непрерывные ряды наблюдений на одном и том же поле или стоковой площадке.

Описанный выше «вспомогательный» характер этих работ привел к тому, что наблюдения проводятся то на одном, то на другом поле. Сроки и место их определяются «потребностями».

Например, наблюдения, ведущиеся для агрономии, перемещаются с поля на поле вслед за сменой культур в севообороте. Эти измерения проводятся только в течение вегетационного периода. Наблюдения на сети опытно-мелиоративных станций обычно имеют такую же организацию и меняют свои сроки, количество и место.

Самостоятельной научной ценности подобного рода наблюдения не представляют. Получаемые материалы обычно используются всего один раз для составления отчетов или проектов.

Расчет водного режима почв на ЭЦВМ позволяют резко уменьшить количество таких наблюдений. Рационализация этих наблюдений может быть такой, что при резком сокращении объема полевых работ количество и качество получаемой информации станет значительно более высоким.

Если начинать наблюдения с определения влагопроводности и ОГХ, то количество проб, отбираемых на влажность, можно резко уменьшить, ограничиваясь только контрольными замерами в экстремальных условиях.

Даже если наблюдения за влажностью на данном поле полностью прекращены, ЭЦВМ может продолжать вычисления водного режима почвы, если в этом есть необходимость. Такая возможность сохраняется в течение 10—20 лет, так как за это время воднофизические свойства большинства почв существенно не изменяются [14].

Закрепив геодезически на местности участок, где проводились замеры влажности, мы можем иметь пункт, на котором в любой момент можно вычислить режим влагопереноса (такая необходимость часто возникает когда в ходе севооборота на этот участок вновь вернется определенная культура или будут производиться мелиоративные опыты).

Таким образом, перенос пунктов наблюдений за водным режимом почвы можно превратить из недостатка в достоинство, сформировав сеть опорных пунктов, которые будут «действовать без наблюдателей». Со временем эта сеть будет становиться все гуще и гуще.

Сама природа экспедиционных исследований и изысканий больше приспособлена к одноразовому определению свойств почвы и периодическим выездам на намеченные пункты для контрольных определений влажности. Организация постоянно действующих пунктов обычно затруднительна, особенно при работе в

малонаселенной местности. Эти наблюдения могут быть одним из источников пополнения «сети без наблюдателей».

Измерения влажности с помощью нейтронного каротажа, гамма-метода и электросопротивлений менее распространены; но более трудоемки и дороги. Стоимость лизиметрических устройств часто превышает десятки тысяч рублей. Это обычно уникальная или несерийная аппаратура, обслуживаемая инженерным и научно-исследовательским персоналом.

Рационализация этих наблюдений и исследований путем одновременного расчета на ЭЦВМ водного режима позволит значительно увеличить объем получаемой информации и ее качество без дополнительных затрат труда и времени.

2. АНАЛИЗ И КОНТРОЛЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Критический контроль наблюдений за влажностью и влагозапасами почвогрунтов путем сравнения с расчетами на ЭВМ

Наблюдения за водным режимом почв на сети опытно-мелноративных станций, постах Гидрометслужбы, в экспедициях проектных и научно-исследовательских организаций дают огромное количество разнообразных данных. Критический контроль этого материала обычно производится качественно, путем простого просмотра или составления совмещенных графиков хода метеоэлементов, уровня грунтовых вод и хронозонплет. Несомненно, что применение даже простейших количественных методов позволит значительно улучшить качество анализа и контроля.

В ходе проведения работы, описанной выше, оказалось, что теоретический расчет эпюр влажности на основе данных о уровне грунтовых вод, испарении, осадках и поливах может оказаться очень полезным для критического контроля материалов наблюдений [42, 84].

Современные модели движения влаги в зоне аэрации несовершенны и не учитывают ряда факторов. Поэтому на первый взгляд может показаться, что сопоставление вычисленного и наблюдаемого режима может служить только для проверки правильности теории, а не для контроля наблюдений.

На самом деле возможность обнаружения ошибок проявляется не в силу того, что теория дает более точные результаты, чем измерения. Просто сам процесс расчета приводит к необходимости введения в ЭВМ данных разнообразных наблюдений, в результате чего ошибки, не заметные при качественном анализе, обнаруживаются в виде расхождений с опытными данными, превышающих погрешность измерений влажности и влагозапасов. Иногда результаты вычислений получаются совершенно абсурдные, хотя исходные данные на первый взгляд вполне приемлемы.

Во всех подобных случаях в первую очередь еще раз прове-

риется сам процесс расчета на ЭВМ: правильность подготовки исходных данных, набивки их на перфокарты, соответствие исходных данных в области их изменения ограничениям, предусмотренным в программе. Если все правильно, производится повторный расчет на ЭВМ, чтобы проверить, не было ли это результатом случайного сбоя или неисправности самой ЭВМ. Если используется отлаженная и неоднократно испытанная программа, в ЭВМ обычно закладываются *разные* перфокарты (массивы) с материалами данных (испарение, осадки, уровни грунтовых вод, гидрофизические характеристики почвы) и *один и тот же* для всех пунктов и сезонов наблюдений массив, содержащий текст программы. Поэтому ошибка в программе не может быть причиной того, что результаты расчетов дают большие расхождения только с некоторой частью наблюдений.

Если подтверждается правильность расчетов на ЭВМ, начинается подробный анализ исходных данных. В первую очередь обычно ставится под сомнение точность определения гидрофизических характеристик почвы. Затем исследуется погрешность данных об осадках, испарении и поливах. Последними анализируются материалы наблюдений за уровнем грунтовых вод; они могут дать значительные ошибки вследствие того, что скважина расположена далеко от участка наблюдений за влажностью, а также из-за гидравлических эффектов, связанных с забивкой фильтра или мощным напорным питанием.

Во всех случаях, когда подозревается неточность в исходных данных, оценивается максимально возможная величина погрешности. Затем производится расчет на ЭВМ по исправленным (на максимально возможную величину ошибки) исходным данным. Как показал опыт, часто такая проверка приводит к тому, что уменьшив расхождение в одном месте, мы сильно увеличиваем его в другом. Иногда введенное «уточнение» ликвидирует только ничтожную часть расхождений. В том и другом случаях это указывает на то, что нужно искать ошибку совсем в других исходных данных.

Если большие расхождения между вычисленными и измеренными влажностями не удается ликвидировать при вариации исходных данных в пределах их предполагаемых ошибок, единственно возможной причиной следует считать ошибки в самой методике наблюдений за водным режимом почв. Обычно применяемый в полевых условиях весовой метод весьма прост, вероятность технических ошибок очень мала. Более вероятно возникновение методических ошибок, в результате которых наблюдения за влажностью почвы становятся нерепрезентативными.

Приведем следующий пример. При расчетах водного режима почвогрунтов Таласского орошаемого массива (Казахстан) оказалось, что в некоторые дни рассчитанные эпюры влажности за 1969 г. очень сильно отклоняются от наблюдаемых. За другие годы подобных расхождений не наблюдалось (см. главу 4). Вы-

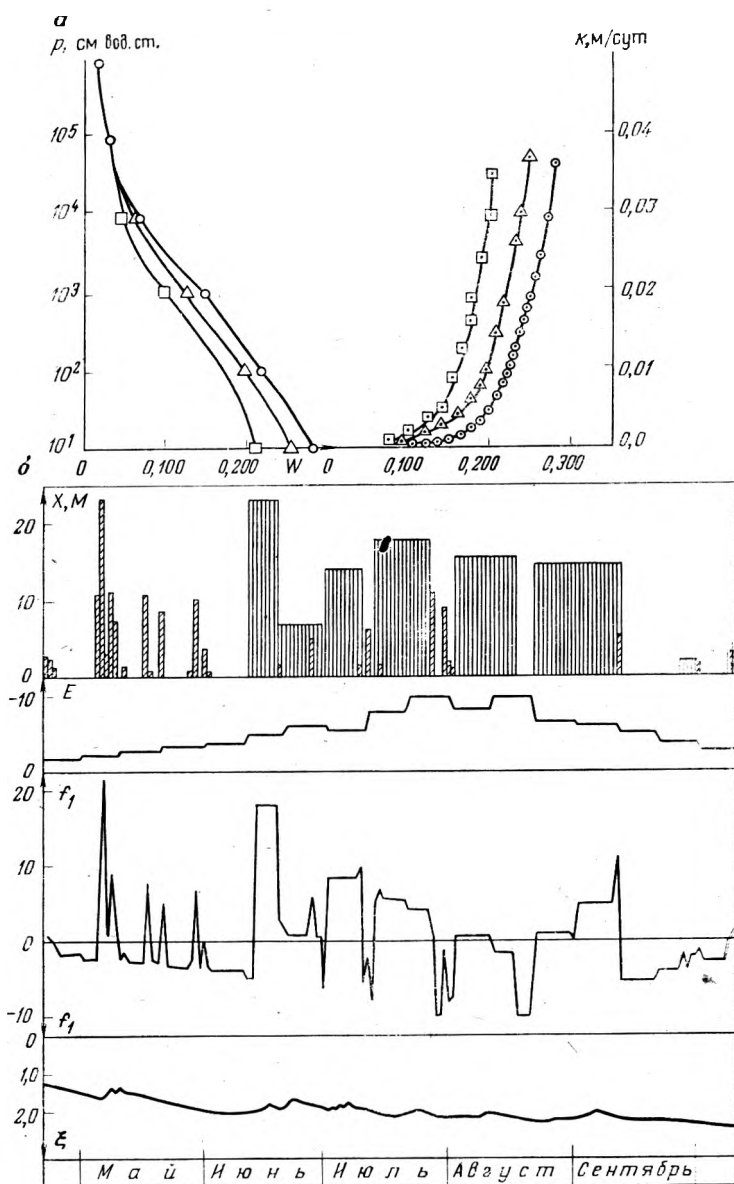


Рис. 22. Гидрофизические характеристики почвы (а) и хронологический график хода гидрометеорологических элементов (б). Поле I, Таласский орошаемый массив, 1969 г.

X, M — осадки, поливы, мм/сут; E — испарение, мм/сут; f_1 — поток на поверхности почвы, мм; ξ — уровень грунтовых вод, от поверхности почвы, м.

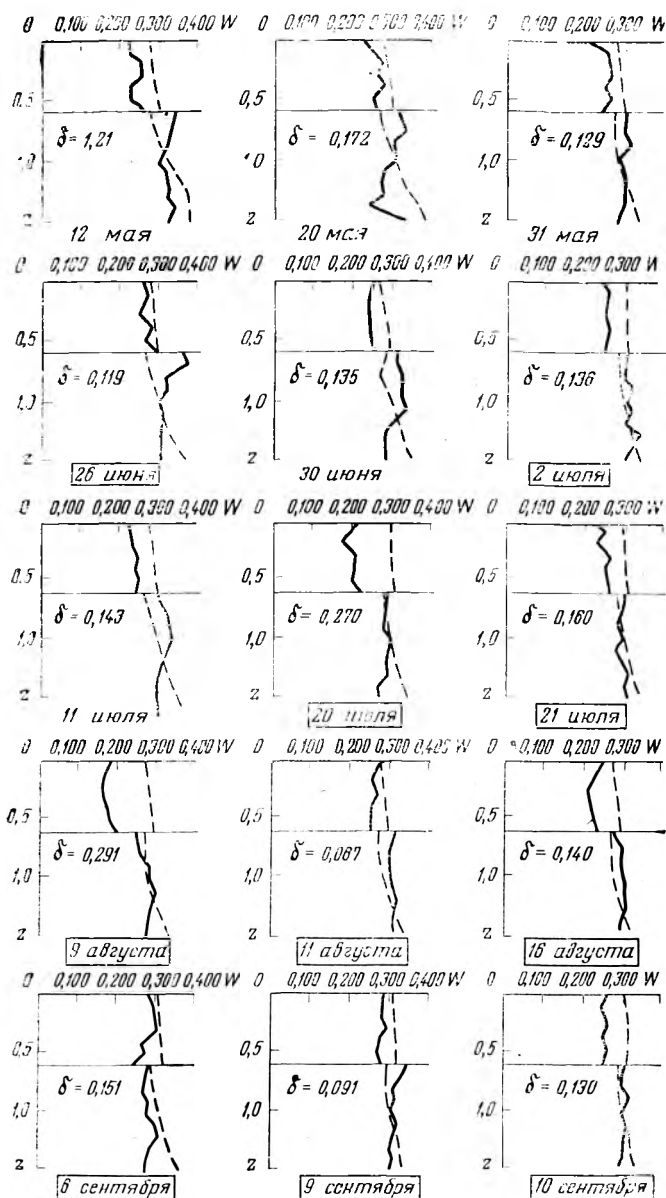
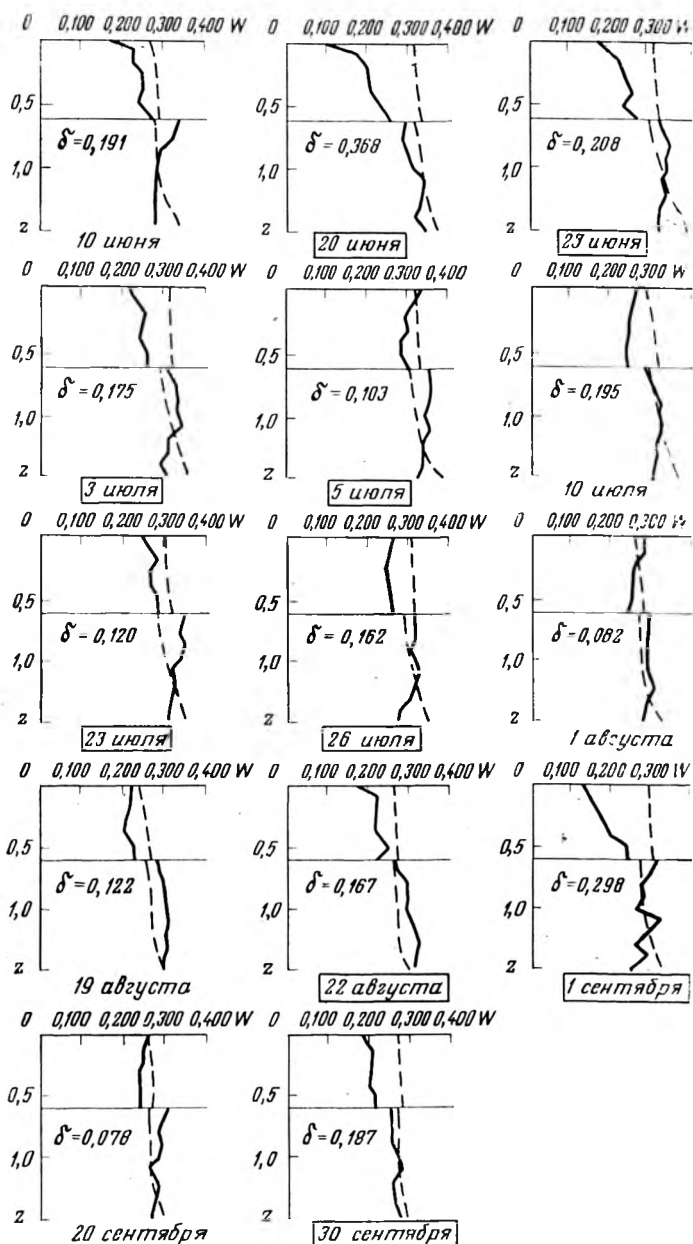


Рис. 23. Эпюры влажности почвы, измеренной в поле (сплошная линия) и в рамке показаны даты измерения, приходящиеся на время полива

$$\delta = \sigma / \bar{W} = \sqrt{\sum (\Delta W)^2 / n} / \bar{W},$$

где $\Delta W = W_{\text{выч}} - W_{\text{изм}}$, n — число послойных определений влажности за каждую дату



численной на ЭВМ (пунктир). 1969 г., поле I, Таласский орошаемый массив.

измерения; W — средняя по глубине влажность на каждую дату измерения

полненный анализ исходных данных по испарению, осадкам и уровням грунтовых вод показал, что погрешность этих данных такая же, как и для других лет наблюдений. Поэтому большие величины расхождений вычисленных и измеренных величин не могут быть объяснены ошибкой в исходных данных.

Тогда был проведен тщательный анализ методики наблюдений за влажностью почвы. При этом обнаружилось (рис. 22, 23), что сроки наблюдений, дающих наибольшие расхождения с расчетом, приходятся на время поливов (в этом году поливы были весьма продолжительными).

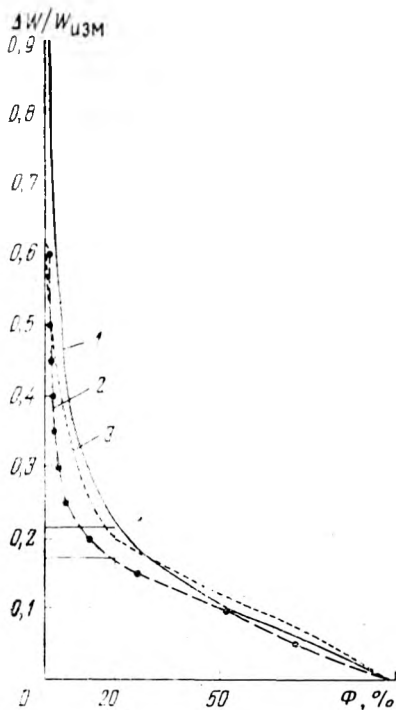


Рис. 24. Обеспеченности относительного отклонения Φ (в %) вычисленных на ЭВМ значений влажности от измеренных, 1969 г., поле I, Таласский орошаемый массив.

Кривые построены: 1 — по вычисленным и измеренным влажностям почвы, включая и даты измерений, приходящиеся на полив (1969 г.). В верхней части ошибки очень большие; 2 — по измеренным и вычисленным влажностям, не приходящимся на время полива поля (1969 г.); 3 — по данным расчетов и измерений за 1968 г. В этом году нет измерений влажности, приходящихся на время полива.

$$\Delta W/W_{\text{изм}} = |W_{\text{выч}} - W_{\text{изм}}| / W_{\text{изм}}$$

Оказалось, что по техническим причинам (недостаток воды) в этом году поливы производились по отдельным участкам поля, причем разница в сроках поливов отдельных участков доходила до нескольких декад. Наблюдения за влажностью проводились на тех участках, где полив еще не был сделан или был сделан несколько дней назад.

Разумеется, такие наблюдения не являются репрезентативными для всего данного поля и должны быть забракованы.

Отметим, что за тот же год наблюдения за влажностью почвы, не приходящиеся на время поливов, дают расхождения с расчетом, не превышающие точность наблюдений при четырехкратной повторности (рис. 24).

Критический контроль наблюдений за водным режимом почвогрунтов путем сравнения с расчетами на ЭВМ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. Важнейшим из них является возможность проведения не только качественного, но и количественного анализа. Гипотезы о причинах погрешностей наблюдений могут быть непосредственно подтверждены или

отвергнуты путем вариации вводимых в расчет на ЭВМ величин, на предполагаемую величину их ошибки. Наконец, существенной является возможность хотя бы частичной механизации процесса критического контроля наблюдений.

Наилучшие результаты этот метод может дать тогда, когда часть материалов наблюдений вызывает подозрение, в то время как все остальные данные удовлетворяют имеющимся стандартам.

Критический контроль лизиметрических наблюдений путем расчетов на ЭВМ по уравнениям движения почвенной влаги

Наблюдения с помощью почвенных лизиметровиспарителей находят все более широкое распространение в практике полевых исследований, проводимых научно-исследовательскими, проектными и производственными организациями. Измерения влагообмена зоны аэрации с грунтовыми водами, получаемые с помощью этих наблюдений, часто являются единственным достоверным источником информации, необходимой для расчета пополнения грунтовых вод при расчете водных ресурсов подземных вод. Полезно также определение подпитки зоны аэрации на орошаемых массивах: уровень грунтовых вод стоит там довольно высоко, и часто открывается возможность значительно уменьшить величину и количество поливов в лимитирующие периоды, если гарантировано восполнение из грунтовых вод запасов влаги в верхних слоях почвы. Большое значение имеют эти наблюдения и при определении эффективности поливов, расчете инфильтрации воды в почву, влагообеспеченности растений и т. д.

Вместе с тем, анализ и критический контроль наблюдений до сих пор ограничивается чисто качественными сопоставлениями. Одной из причин этого является отсутствие метода расчета, позволяющего непрерывно, день за днем, рассчитывать наблюдаемые величины инфильтрации в грунтовые воды и подпитку зоны аэрации.

Однако достоверность измеряемых величин в значительной степени зависит от качества работы подпитывающих устройств, надежность которых пока невелика.

В ходе расчетов водного режима лизиметров выяснилось, что применение описанного выше метода расчета может служить прекрасным средством анализа и критического контроля правильности работы лизиметра. Сопоставление вычисленных и наблюдаемых величин потока через дно лизиметра позволяет четко выявить периоды, за которые лизиметрическая установка работала недостаточно надежно.

В качестве примера на рис. 25 показаны расчетные (сплошная линия) и измеренные (пунктир) величины суммарного от

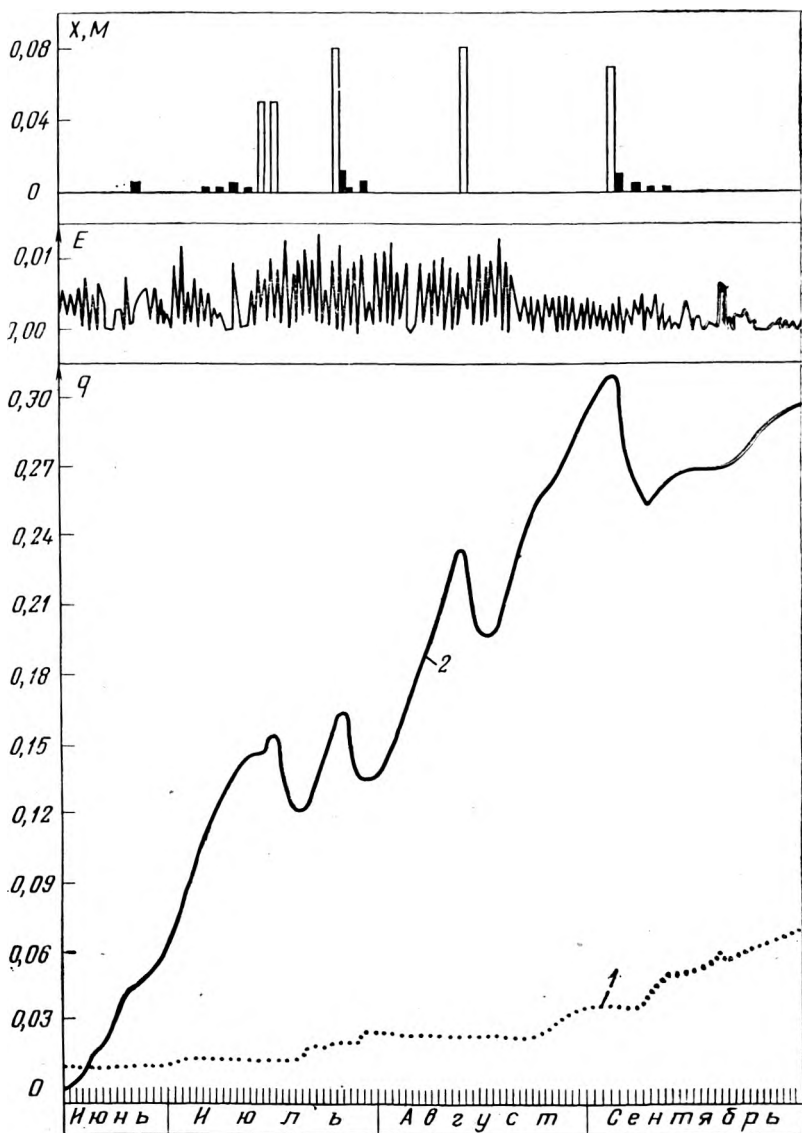


Рис. 25. Хронологический график по почвенному гидравлическому лизиметру-испарителю за 1969 г. Таласский орошаемый массив.
 X, M — осадки, поливы, м/сут; E — испарение, м/сут; q — суммарный слой влаги, прошедший через дно испарителя за расчетный период, м (1 — измеренные величины, 2 — вычисленные на ЭВМ)

начала сезона потока через дно почвенного гидравлического лизиметра-испарителя глубиной в 1,5 м.

Как видно из рис. 25 вычисленные значения значительно больше измеренных. Это не может быть обусловлено физикой процесса, потому что наблюдения по этому же лизиметру за другие годы и за этот же год по другим лизиметрам не дают таких огромных расхождений с расчетом.

Как показал специальный анализ первичных материалов (книжек), причина этого заключается в том, что в течение вегетационного сезона 1969 г. подпитывающее устройство лизиметра работало недостаточно надежно и не обеспечивало достаточной подачи воды к дну.

Таким образом, критический контроль, проведенный путем сопоставления измеренных и вычисленных величин, показал, что наблюдения за этот год нерепрезентативны и могут быть в лучшем случае использованы как данные наблюдений в обычном испарителе без подпитки.

В заключение отметим, что данный метод анализа и критического контроля особенно полезен для выявления больших технических и методических ошибок наблюдений, особенно в тех случаях, когда имеются наблюдения за несколько лет или сезонов или измерения в нескольких лизиметрах разной глубины.

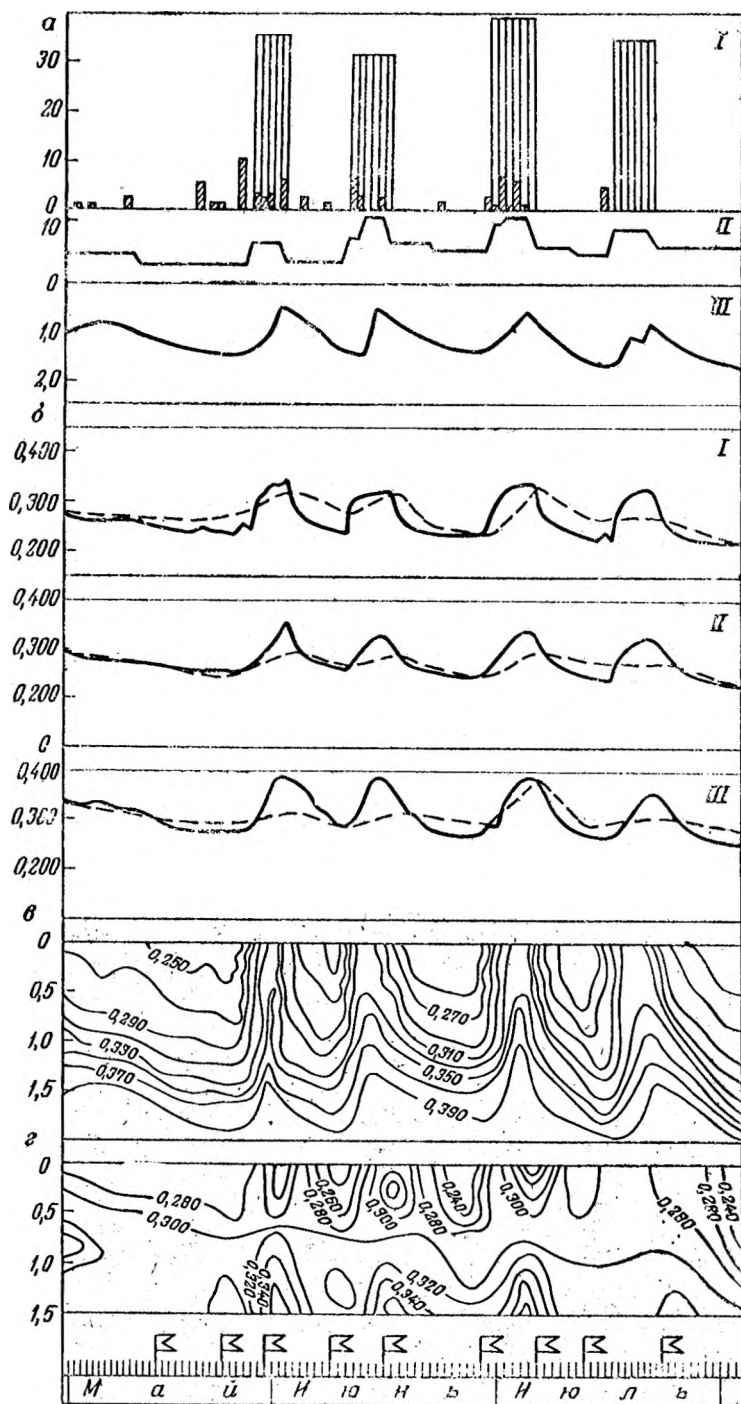
3. ПОСТРОЕНИЕ ХРОНОИЗОПЛЕТ, ВЫЧИСЛЕНИЕ СРЕДНИХ, ИНТЕРПОЛЯЦИЯ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ

Наблюдения за влажностью почвы весовым методом на сети станций ГУГМС проводятся обычно не чаще одного раза в декаду. Примерно такая же или даже меньшая частота принята гидрогеологами, агрономами, мелнираторами и другими специалистами. Экспедиции, работающие на орошаемых массивах, ставят наблюдения до и после поливов, но общее количество замеров остается примерно таким же.

При использовании данных таких наблюдений для научных обобщений или прикладных расчетов почти всегда возникает необходимость найти слой влагозапасов или эпюры влажности в моменты, лежащие между сроками наблюдений. Эта задача обычно решается путем построения по *измеренным* значениям хронологических графиков хода влажности отдельных слоев почвы (рис. 26,а) или хроноизоплет (рис. 26,б).

Хроноизоплеты вообще очень широко используются в почвенной гидрологии как удобное средство сведения в единую картину данных наблюдений за влажностью и позволяют провести критический контроль и анализ фактических данных.

Когда между сроками наблюдений выпадают осадки, то результаты графической интерполяции между наблюдаемыми величинами, как правило, оказываются неверными. Если, например, эпюры одинаковы для двух соседних сроков, то графиче-



ская интерполяция даст одинаковую влажность почвы на протяжении всего периода, тогда как фактически имеет место резкое возрастание влажности в момент выпадения дождя и последующее постепенное уменьшение ее. Эти явления особенно сильно проявляются при наблюдениях на орошаемых землях. Интерполяция между значениями влажности, измеренными до и после поливов, дает совершенно неправильную картину.

Формальная интерполяция влажности почвы может привести к ряду существенных ошибок в прикладных гидрологических расчетах. Например, А. Р. Константинов отмечал, что необходима специальная интерполяция между наблюдениями, чтобы избежать погрешностей в расчете испарения воды с поверхности почвы.

При расчете средних за некоторый период влагозапасов — величины, чрезвычайно широко используемой во многих прикладных расчетах, — как среднеарифметической величины наблюдаемых значений «значения ошибок достигают десятков и сотен процентов, что далеко выходит за пределы точности измерения влагозапасов любым из существующих методов» [34, 35].

Увеличение числа сроков наблюдений за влажностью почвы приводит к значительному возрастанию объема полевых работ — вряд ли реально осуществимо в настоящее время. Кроме того, наблюдения за влажностью почвы с помощью стандартных буров во время поливов и дождей и в течение нескольких последующих дней почти всегда приводят к систематическим ошибкам вследствие выжимания воды при отборе образцов.

По той же причине возникает необходимость экстраполяции по глубине на орошаемых землях и в других районах с высоким стоянием уровня грунтовых вод. Наблюдения весовым методом в зоне капиллярной каймы, как правило, дают здесь систематическое преуменьшение фактических величин.

Интерполяция и экстраполяция в принципе могут быть осуществлены путем совместного применения весового метода и наблюдений с помощью датчиков (омических, изотопных, термических и др.). К сожалению, эти приборы пока мало распространены, требуют высококвалифицированного обслуживания и не всегда дают хорошие результаты [74]. Поэтому их применяют только в некоторых специальных исследованиях.

Рис. 26. Совмещенный график. Таласский орошаемый массив, поле I, 1968 г.
а — осадки, поливы (I), испарение (II), уровень грунтовых вод (III); *б* — хронологический ход влажности почвы на глубине 10 см (I), 50 см (II), 100 см (III) (сплошная линия — вычисленные значения влажности, пунктир — измеренные значения влажности); *в* — хроноизоплеты, построенные по вычисленным на ЭВМ ежесуточным значениям влажности почвы; *г* — хроноизоплеты, построенные по измеренным значениям влажности почвы. Флажками на оси времени обозначены даты измерений влажности весовым методом

Часто необходимо обработать данные, полученные за предыдущие годы, когда наблюдения косвенными методами не производились или были прерваны из-за неисправности аппаратуры.

Опыт прикладных расчетов водного режима почвогрунтов на ЭЦВМ показывает, что во всех этих случаях для экстраполяции и интерполяции наблюдений полезно производить расчет динамики влажности почвы по простейшим уравнениям влагопереноса.

Вначале так же, как это было описано выше, выполняется расчет эпюр влажности на те моменты, когда проводились наблюдения. Сравниваются вычисленные и измеренные величины и строится кривая обеспеченности относительных отклонений. Если расхождения лежат в пределах точности наблюдений, то производится расчет с выдачей на печать расчетных значений влажности за более короткие сроки (например, ежесуточных). По этим данным строятся хроноизоплеты.

Особенно удобно проводить эти работы в режиме диалога человек — ЭВМ. На первом этапе на электронно-лучевую трубку выдаются совмещенные вычисленные и измеренные эпюры влажности и кривая обеспеченности относительных ошибок. При обнаружении существенных расхождений производится проверка исходных данных (в ЭВМ вводятся довольно большие массивы данных, и незаметные ошибки при переписывании исходных данных и перфорации могут приводить к большим расхождениям). Если расхождения несущественны, то немедленно дается команда на вычисление хроноизоплет. Сам процесс вычисления хроноизоплет легко реализуется путем нахождения по стандартной подпрограмме интерполяции глубин, на которых находится заданное значение влажности. В качестве исходных данных для интерполяции используются профили влажности, вычисленные в машине на каждом шаге во времени.

Вычисленные очертания хроноизоплет выдаются на электронно-лучевую трубку, и после контроля оператора в случае необходимости подается команда на вычисление добавочных изолиний. Дополнительным преимуществом здесь является механизация весьма трудоемкой графической работы по построению хроноизоплет.

Если ЭВМ не оборудована приставкой для выдачи результатов счета в виде графиков, то хроноизоплеты проводятся вручную или с помощью одной из специализированных машин для проведения изолиний.

С точки зрения гидрологии почв основным вопросом является то, насколько существенно отличаются хроноизоплеты, полученные в результате расчета по данной методике, от хроноизоплет, построенных по материалам фактических наблюдений.

В качестве примера на рис. 26,б приведены графики хода во времени влажности различных слоев почвы, построенные путем графической интерполяции по измеренным значениям и вычис-

ленные на ЭВМ БЭСМ-4. Как можно видеть из этого рисунка графическая интерполяция дает значительно более сглаженный ход влажности, особенно в верхних слоях почвы.

Еще больше различие между хроноизоплетями, построенными по общепринятой методике (см. рис. 26,2) и вычисленными (см. рис. 26,б). На рис. 26,2 преобладают мелкие замкнутые «пики» и «котлованы». Подобная картина часто наблюдается, когда замеры не захватывают экстремальные элементы поля и имеют ограниченную точность.

Фактически существующая методика измерения влажности весовым методом представляет собой как бы топографическую съемку, которая проводится с низкой точностью и *намеренно игнорирует все холмы и пики рельефа**.

На рис. 27 видно, какие трудности испытывает инженер, проводя хроноизоплеты по *измеренным* значениям. Например, линия соответствующая 35%, не может быть проведена выше, так как окажется между значениями влажности, существенно меньшими 35%. На самом деле при поливе влажность верхних слоев почвы несомненно близка к полной влагоемкости, потому что на поверхности стояла вода.

Парадоксальным кажется тот факт, что по замерам влажности в период между поливом и после полива *вычисленные хроноизоплеты дают картину более близкую к фактической, чем построенные по наблюдениям весовым методом*. Действительно, в этот период влажность почвы выше измеренной как до, так и после полива. Поэтому графическая интерполяция дает всегда заниженные значения.

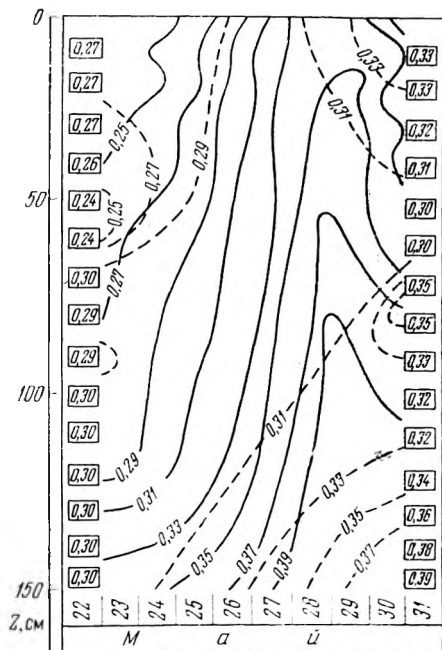


Рис. 27. Фрагмент хроноизоплет, построенных по измеренным (пунктир) и вычисленным на ЭВМ (сплошная линия) эпюрам влажности почвы. Измеренные 22 и 31 мая весовым методом значения влажности приведены в рамке на краях графика (среднее по четырем повторностям)

* Существующая сейчас методика измерения влажности весовым методом запрещает производить бурение скважин при высоких влажностях.

В период от дополнительного замера до начала полива графическая интерполяция будет почти всегда давать завышенные значения, потому что хроноизоплеты ориентируются на высокие послеполивные влажности. Поэтому и здесь вычисленные хроноизоплеты точнее.

Аналогичную картину мы будем наблюдать при выпадении значительных осадков.

В периоды, когда нет осадков или поливов, расчетные хроноизоплеты не могут иметь большую точность, чем проведенные графическим путем. Они просто позволяют систематизировать и увязать *количественно* наблюдения за влажностью почвы, уровнем грунтовых вод и метеоземлементами. Однако даже это дает возможность обнаруживать грубые ошибки наблюдений и вести критический контроль.

При расчете средних за данный период влагозапасов расчет по предлагаемой методике структурно более сложен, чем по формуле А. Р. Константинова [34, 35]. Однако практически (особенно при необходимости обработать большой материал) расчет по динамическим уравнениям менее трудоемкий и проводится быстрее, так как все вычисления производятся с помощью быстродействующих ЭВМ.

Ряд преимуществ данного метода по сравнению с формулой А. Р. Константинова обусловлен более полным учетом физики процесса. Так, например, как отмечает сам автор формулы [34, 35], прямолинейная интерполяция, на которой базируется вывод, должна быть в принципе заменена криволинейной (в простейшем случае — по экспоненте). Но в этом случае формулы получаются очень сложными. При расчете на ЭВМ интерполяция ведется более совершенным путем, учитывая не только криволинейность, но и весь комплекс метеорологических и гидрогеологических условий, гидрофизические свойства почвы и некоторые особенности механизма влагопереноса.

А. Р. Константинов отмечает, что формула неприменима, если часть осадков просачивается в грунтовые воды или, наоборот, происходит сильная подпитка при изменяющемся уровне грунтовых вод. Предлагаемый метод может быть использован и в этих случаях, так как учитывает подпитку и изменение во времени уровня грунтовых вод. Определенным преимуществом является также то, что может быть проведен расчет средних за любой период влагозапасов в любом слое почвы, а не только в целом по всей зоне, где накапливаются выпадающие осадки.

Необходимо подчеркнуть, что все преимущества применения расчетного метода не в том, что математическая модель влагопереноса позволяет получить более точные данные, чем измерения. Напротив, современные модели влагопереноса (в особенности простейшая из них, использованная нами) чрезвычайно примитивны. Однако даже самая простая модель позволяет использовать для интерполяции и экстраполяции не только мате-

налы наблюдений за влажностью почвы, но и за осадками, дождями, испарением, уровнем грунтовых вод, характеристиками почвы. Именно дополнительная информация, содержащаяся во всех этих наблюдениях, позволяет получать в некоторые периоды расчетные значения, более точные (репрезентативные), чем те, которые даст простая интерполяция по замерам весовым методом.

Таким образом, если результаты измерений влажности и расхода на ЭВМ по уравнениям влагопереноса имеют порядок, равный с точностью наблюдений, целесообразно вести прогрессивные хроноизоплоты и интерполяция между наблюдениями на ЭВМ, пользуясь расчетным методом.

В периоды между наблюдениями, когда выпадают значительные осадки, рассчитанные на ЭВМ хроноизоплоты и хронологические графики дают более точные результаты, чем построенные по общепринятой методике путем графической интерполяции между измеренными значениями. Аналогичная картина наблюдается на орошаемых землях, когда между наблюдениями производится полив.

В прикладных расчетах вычисление на ЭВМ средних значений влагозапасов за необходимые периоды позволяет избежать ошибок в десятки и сотни процентов, если между сроками наблюдений проходят осадки или поливы.

Во многих случаях необходимо провести интерполяцию или экстраполяцию в пространстве и времени. Например, восстановить данные за некоторые пропущенные сроки наблюдений, считать, что происходит глубже метрового слоя, где ведутся замеры. Во всех этих случаях применение описанной методики может быть очень полезным.

4. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ НА «СОСЕДНИЕ» И «АНАЛОГИЧНЫЕ» УЧАСТКИ

В лизиметре и в поле даже при одинаковых осадках и поливных нормах (что далеко не всегда имеет место [83]) формируется неодинаковый режим вертикального влагообмена. Различия в земных условиях обычно незначительны и лежат в пределах точности инструментальных измерений элементов водного баланса [15]. Обычно существенно различается динамика уровня грунтовых вод, так как в лизиметрах чаще всего поддерживается постоянный уровень грунтовых вод. Никогда не удастся добиться идентичности воднофизических свойств монолита лизиметра и почвогрунта данного участка. Несовпадение темпов и условий развития растений, различные эффекты от проведения опытов и тех же агротехнических мероприятий, адвективные эффекты и многое другое приводят к тому, что испарение из лизиметра имеет совсем другие величины, чем естественное.

Цель лизиметрических наблюдений — расчет естественных процессов на обычном поле. Поэтому приходится вводить некоторые поправки (переходные коэффициенты), основываясь на произвольных гипотезах или каких-нибудь эмпирических зависимостях.

Аналогичные трудности возникают при необходимости рассчитать водный режим почв на «соседнем» или «налогичном» участке. Специальные опыты на ЭЦВМ показали, например, что, если в расчет вводятся гидрофизические характеристики «соседнего» поля, то результаты получаются неудовлетворительными. Таким образом, при экстраполяции надо учитывать свойства почв.

Применяя описанный выше метод расчета на ЭЦВМ, можно вести экстраполяцию достаточно просто и, вместе с тем, объективно [71]. Вначале на ЭЦВМ рассчитывается водный режим участка (или лизиметра), на котором есть наблюдения. Расчетные и наблюдаемые величины сравниваются, как это было описано в предыдущей главе. Если они хорошо согласуются, то расчет водного режима на «соседнем» участке ведется по той же программе для ЭВМ, но массивы исходных данных (испарение, осадки, поливы, УГВ, воднофизические характеристики) берутся уже для «соседнего» участка поля.

Преимущества такого метода заключаются в следующем:

1) экстраполяция рассчитываемого элемента осуществляется «автоматически» на ЭВМ. Нет надобности строить график связи или вводить произвольные гипотезы;

2) комплексно используются все гидрометеорологические, почвенные и гидрогеологические материалы. Различия в тех или иных свойствах всегда могут быть учтены;

3) экстраполяция может быть проведена на любые сроки и за любые интервалы времени, как для всей зоны аэрации, так и для отдельных слоев;

4) для экстраполяции не используются ошибочные материалы наблюдений, так как уже на первом этапе производится их критический контроль, путем сравнения с расчетами на ЭЦВМ.

Комплексный подход, описанный выше, позволяет дать конструктивное решение проблемы репрезентативности лизиметрических наблюдений. Дискуссии о том, насколько режим в этих приборах отличается от естественного, ведутся в течение десятилетий.

Имея возможность рассчитывать водный режим почвы на ЭЦВМ, лизиметр надо рассматривать уже не как сенсор, служащий для измерения определенных величин, а как тест-объект, который необходим для принятия качественного, наиболее важного решения: годится ли сам метод расчета для данных природных условий.

5. СЪЕМКИ ВЛАЖНОСТИ И ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЛАГОЗАПАСОВ

Эти работы проводятся сравнительно редко, но трудоемкость их довольно велика. Цель — исследование вариацни водного режима почв по площади. Применение — планирование минимального числа датчиков для автоматизации поливов, выбор оптимального количества замеров влажности для обеспечения заданной точности расчетов и др.

Пространственная вариация поля влажности изменяется во времени [14, 74]. Обычно дисперсия больше во влажные периоды, чем в сухие. Напротив, коэффициент вариации достигает максимальных значений в период засух. Поэтому вместо одной съемки надо проводить несколько. Но это, конечно, тоже не дает полной картины, хотя сильно повышает трудоемкость работ.

Применение расчетов на ЭЦВМ позволяет коренным образом изменить методику этих работ, резко уменьшить их трудоемкость и одновременно увеличить качество получаемой информации.

Идея заключается в следующем. Одновременно с первой съемкой влажности проводится определение гидрофизических характеристик почвы в этих же точках. После этого все остальные «съемки» влажности можно получать расчетом на ЭЦВМ.

Преимущества такого подхода заключаются не только в резком уменьшении объема (сроков) полевых работ, но и в возможности рассчитать вариацию влажности в экстремальных ситуациях. Например, в период сильной засухи или выпревания растительности. При чисто экспериментальном подходе может пройти много лет, прежде чем представится возможность провести такие наблюдения.

Появляется возможность вычисления не только вариации влажности и влагозапасов, но также и потоков, питания грунтовых вод, интенсивности впитывания и проч.

Отметим также, что после проведения съемки гидрофизических характеристик на поле возникает «незримая сеть наблюдений», позволяющая получать расчетным путем значения влажности в весьма высокой повторности.

Пока не удалось полностью осуществить реализацию этой идеи, но некоторые ориентировочные расчеты такого рода были проведены в предположении стационарного режима влагопереноса в зоне аэрации [62]. Результаты получаются весьма обнадеживающие. В частности, вычисленные по такой «съемке» коэффициенты вариации оказываются близкими к полученным экспериментальным путем в ходе обычной съемки.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ

Расчет на ЭЦВМ является пока единственным средством, с помощью которого можно получать все необходимые характеристики водного режима зоны аэрации при новых способах мелиорации до проведения трудоемких и дорогостоящих полевых испытаний. Особенно перспективным кажется применение ЭЦВМ при анализе новейших способов двойного регулирования водного режима.

При изысканиях и проектировании изменений водного режима в районах, не имеющих сети наблюдений за влажностью, техника такого рода полезна для «восстановления» рядов наблюдений по метеорологическим данным. Во многих районах намечаемой переброски стока наблюдений очень мало или вообще нет.

Водоснабжение в пустынях всегда тесно связано с проблемой питания линз пресных грунтовых вод. Расчет потоков влаги на ЭЦВМ может помочь объективно решать эти задачи. Если расчет питания проводится по нескольким наблюдаемым эпюрам влажности [93], никогда не известно, насколько точно эти многочисленные наблюдения отражают многолетний режим питания. Вычисления позволяют получить эпюры влажности для таких расчетов за многие годы, тем более что гидрофизические свойства почв пустыни практически не изменяются в течение столетий.

Эти и аналогичные им задачи часто называют прогнозом водного режима в том смысле, что расчеты позволяют в некоторой степени предвидеть общую тенденцию изменения характера влагопереноса *в среднем*, статистически.

Есть, однако, и другая задача: прогноз водного режима *вперед на определенный конкретный срок*. Разработка таких методик — дело будущего. Когда будут найдены надежные способы прогноза погоды, расчеты нетрудно будет проводить путем прямого применения описанных выше алгоритмов.

Однако существует одна возможность таких прогнозов. Ю. А. Алехин с сотрудниками в течение последних двадцати лет систематически опробовал для сверхдолгосрочных прогнозов различных геофизических явлений модификацию метода линейного экстраполирования (во времени).

Удачные результаты получаются только для некоторых геофизических характеристик. Полностью понять, почему так происходит, все еще не удалось. Сама идея пока не имеет надежного теоретического обоснования и поэтому оспаривается некоторыми учеными.

В лаборатории гидрофизики почв СНИИГМ совместно с ЛГМИ был выполнен [62] ряд экспериментальных сверхдолгосрочных прогнозов влагозапасов зоны аэрации по формуле

$$H^{l+1} = \sum_{i=l-n}^l k^i H^i, \quad (5.1)$$

где H^i — влагозапасы в метровом слое почвы во временном узле i ; k^i — коэффициенты линейного экстраполирования, определяемые эмпирически путем обработки предшествующих наблюдений.

Прогнозы проводились с различным шагом по времени: декада, месяц, три месяца. В зависимости от выбора шага получается экстраполированное на соответствующий срок значение H^{l+1} .

Сама возможность таких прогнозов на несколько месяцев вперед кажется довольно фантастической. Тем более что надежный прогноз погоды пока имеет заблаговременность не более трех суток. Существует школа метеорологов, считающая, что научное предсказание атмосферных процессов на значительно более длительные сроки вообще невозможно.

Тем не менее результаты экспериментальных прогнозов получились весьма обнадеживающими [62]. Коэффициенты корреляции наблюдаемых и рассчитанных влагозапасов обычно превышали 0,8, а обеспеченность удовлетворительных прогнозов — более 80%. Такие показатели считаются хорошими для гидрометеорологических прогнозов (рис. 28, 29).

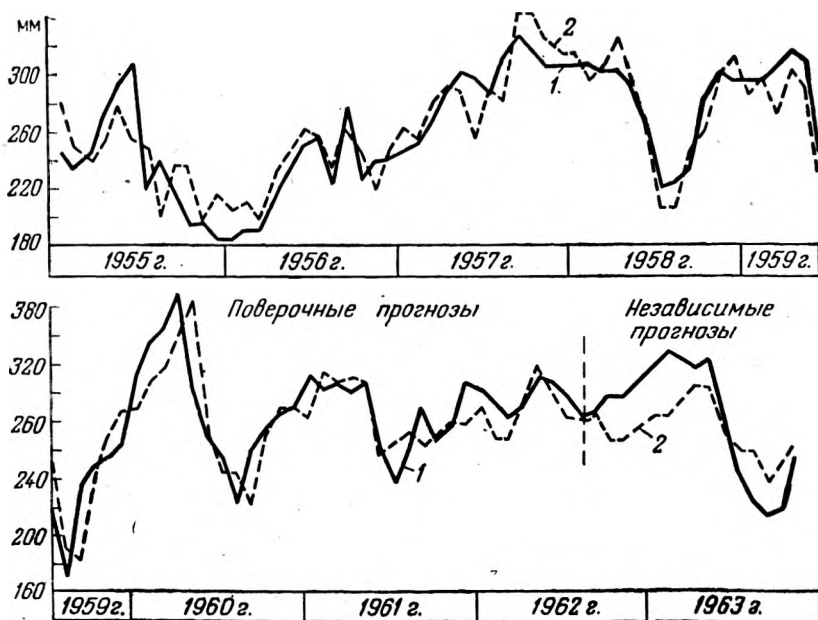


Рис. 28. Измеренные (1) и спрогнозированные (2) влагозапасы в слое 1 м. Лог Тажный, Валдай

Существует, однако, одно ограничение, из-за которого широкое применение этого метода для прогноза водного режима почвы весьма затруднительно. Для вычисления коэффициентов экстраполирования в формуле (5.1) необходимо иметь достаточно длительные ряды наблюдений за влажностью (20—30 лет). А их очень и очень мало.

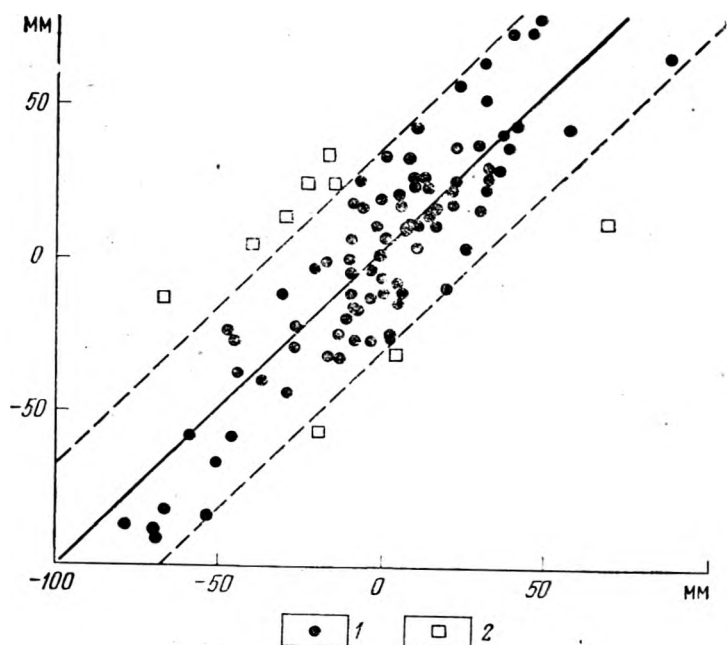


Рис. 29. Связь между фактическими и спрогнозированными влагозапасами (в отклонениях от нормы). Лог Таежный. Валдай.

1 — удовлетворительные прогнозы; 2 — неудовлетворительные прогнозы. Коэффициент корреляции $R=0,83$

Описанный выше метод восстановления рядов наблюдений может быть использован для получения достаточно длинных серий значений влажности и влагозапасов. Затем можно экстраполировать эти ряды и получить сверхдолгосрочный прогноз влагозапасов на 1—3 месяца вперед.

Одноэтапный метод прогноза путем построения линейных зависимостей вида (5.1) экстраполированных влагозапасов от предшествующих значения метеоэлементов всегда дает плохие результаты. Связь увлажнения почвы с метеообстановкой существенно нелинейна и поэтому использование линейной экстраполяции невозможно. При расчете в два этапа эта нелинейность учитывается при восстановлении рядов влажности.

Предоставляя читателю самому оценить качество таких экстраполяций, отметим только, что других методов сверхдолгосрочного прогноза водного режима пока нет.

7. НЕКОТОРЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ПРОИЗВОДЯЩИЕ РАСЧЕТЫ НА ЭЦВМ ВОДНОГО РЕЖИМА ЗОНЫ АЭРАЦИИ

Укажем некоторые организации, производящие сейчас расчеты на ЭЦВМ водного режима зоны аэрации. Выбор их произволен.

1. Агрофизический научно-исследовательский институт. Ленинград, Гражданский пр., 14.

2. Белорусский научно-исследовательский институт мелиорации и водного хозяйства. Минск, ул. Горького, 153.

3. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации. Москва, ул. Прянишникова, 19.

4. Государственный гидрологический институт. Ленинград, В. О., 2 линия, д. 23.

5. Институт гидромеханики СО АН СССР. г. Новосибирск, Академгородок.

6. Киевский государственный университет, кафедра гидрогеологии. Киев, Владимирская ул., 64.

7. Московский гидромелиоративный институт. Москва, ул. Прянишникова, 19.

8. Московский государственный университет. Москва, Ленинские горы.

9. Северный институт гидротехники и мелиорации. Ленинград, ул. Ракова, 17.

10. Средазгипроводхлопок. Ташкент, ул. Навои, 44.

11. Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2.

12. Центральный институт прогнозов. Москва, ул. Павлика Морозова, 12.

Список этот приведен для того, чтобы каждый, у кого возникнет необходимость, мог проконсультироваться, достать более совершенные программы для ЭЦВМ, методики, приборы.

Большинство этих организаций имеет также ряд усложненных программ для ЭВМ, которые могут рассчитывать некоторые вторичные величины, например перенос солей. Агромелиоративные организации обычно используют модели, в которые встроена растительность. Водный режим они считают примерно с такой же точностью, как и более простые программы, но зато по ним можно вычислить некоторые биологические характеристики.

Во многих из этих организаций существуют небольшие группы, занимающиеся опытным определением гидрофизических характеристик почвы, необходимых для расчетов на ЭЦВМ. Здесь можно проконсультироваться, освоить более точную методику и даже заказать анализы «своих» почв.

Ограничения, которые следует наложить на применение описанного выше метода расчета, обусловлены в основном двумя причинами.

Во-первых, при низкой точности исходных данных хороших результатов не получится. Поэтому разделы 1 и 2 будут посвящены исследованию влияния точности исходных данных на результаты вычислений.

Во-вторых, существуют чисто физические ограничения, обусловленные несовершенством самой модели. В последнем разделе этой главы мы приведем те из них, которые *действительно* проявлялись в виде существенных расхождений в реальных расчетах водного режима почвогрунтов.

1. ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ПОГРЕШНОСТЬ РАСЧЕТА

В общем случае для решения поставленной задачи необходимо выполнить весьма сложное исследование статистических характеристик изменения влажности, возникающего под действием «помех», накладываемых на исходные данные. Оператор, связывающий входы и выход, является существенно нелинейным. Статистические характеристики ошибок определения исходных данных не исследованы на достаточно большом материале: фактически мы знаем сейчас только ориентировочные величины ошибок измерения (или вычисления) испарения, осадков и поливов; пока нет почти никаких данных о статистике основной гидрофизической характеристики (зависимости потенциалов от влажности).

Поэтому подробное статистическое исследование является пока преждевременным и следует обратиться к анализу простейших случаев с тем, чтобы получить в начале порядок возможных ошибок и исследовать влияние каждой из величин, вводимых в расчет на конечный результат.

Большую часть подобных исследований можно провести только с помощью численных опытов на ЭВМ. Некоторые простейшие случаи удастся исследовать аналитически. Как будет показано далее, изучение их позволяет наметить направление, в котором должны проводиться численные опыты для наиболее быстрого решения поставленной задачи, а также дальнейшее усовершенствование моделей.

Две меры расхождения расчетных и измеренных эпюр влажности

При сравнении вычислений с полевыми наблюдениями нельзя использовать только одну меру.

На рис. 30 показаны расчетная и измеренная эпюры влажности. На глаз совпадение их кажется весьма хорошим, однако нетрудно убедиться, что на глубине z_1 относительное отклонение вычисленной величины влажности достигает 100%. Подобного рода эффекты чаще всего наблюдаются на контакте тяжелых и легких грунтов. Глубина, на которой разлежит граница слоев, в разных точках участка может быть различной, наблюдения (бурение на влажность) имеют разрешающую способность порядка 10 см; возможны также особого рода методические погрешности [43], из-за которых можно ошибиться в определении «истинной» глубины от поверхности почвы. Все это указывает на то, что иногда за меру отклонений надо выбирать расстояние между эпюрами по вертикали.

Но нельзя оперировать *только* расстояниями по вертикали. На том же рис. 30 показаны точки A и B , соответствующие одной и той же влажности, но отстоящие друг от друга на метр. Здесь правильное пользоваться отклонениями по влажности.

По-видимому, надо использовать обе меры. Если расхождение не превышает *хотя бы одной из них*, то совпадение эпюр можно считать хорошим.

Отчасти это является следствием самой природы наблюдаемой величины, но в значительной степени определяется несовершенством принятой сейчас методики наблюдений.

В дальнейшем мы будем широко использовать эту особенность, принимая допустимое отклонение по глубине меньше 10 см, а по влажности меньше 10% от измеренной величины.

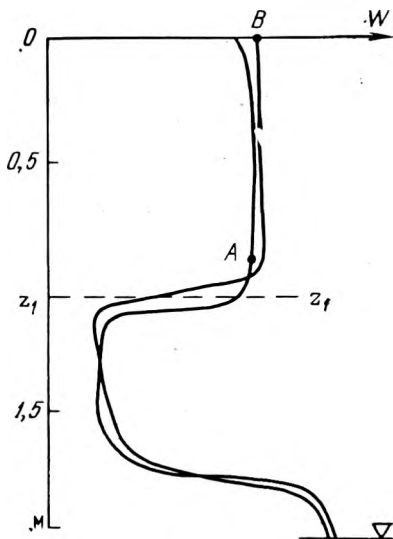


Рис. 30. Измеренная и вычисленная эпюры влажности почвы

Распределение влаги, близкое к равновесному

В этом случае в зоне аэрации капиллярно-сорбционный потенциал (см. вод. ст.)

$$p = \xi - z, \quad 0 \leq z < \xi. \quad (6.1)$$

Ошибка вычисления влажности почвы определяется только погрешностью основной гидрофизической характеристики. Поэтому точность расчета на ЭВМ зависит от того, насколько подробно вводятся в машину данные о зависимости потенциала от влажности. При лабораторных определениях с помощью комплекса приборов, состоящего из капилляриметра, мембранного и пластиночного прессы и установки для гигроскопии, обычно получают около 10 точек кривой $p(W)$. Если эти данные вводят в ЭВМ и в расчете используется стандартная программа для прямой интерполяции, то ошибка может превысить допустимую. Следовательно, при расчете на ЭВМ необходимо задавать либо большое количество точек, снятых со сглаженной кривой $p=f(W)$, либо использовать специальную программу для аппроксимации или криволинейной интерполяции. В приведенных выше примерах расчета применен первый из этих способов; массив p, W состоял из 60 пар чисел.

Полезность применения оценок погрешности расчета эпюр влажности почвы, полученных на основе равновесного решения (6.1), определяется тем, что на орошаемых землях в зоне избыточного увлажнения и в других районах, где уровень грунтовых вод стоит в нескольких метрах от поверхности, распределение влаги по глубине очень близко к равновесному уже на глубине около 0,5 м. Поэтому *точность расчета* влажности почвы на ЭВМ вблизи зеркала грунтовых вод почти не зависит от погрешности определения влагопроводности почвы и лимитируется ошибкой основной гидрофизической характеристики.

Влияние уровня грунтовых вод

Даже при значительном подтоке воды из грунтовых вод в зону аэрации распределение влажности вблизи УГВ отличается от равновесного на величину, меньшую погрешности четырехкратного определения весовым методом. Это объясняется тем, что при высоких влажностях влагопроводность почвы велика, и достаточно весьма малого отклонения от равновесного состояния, чтобы пропустить потоки влаги порядка нескольких миллиметров в сутки.

В этих условиях максимально возможное влияние, которое может оказать небольшое перемещение уровня грунтовых вод, лежит в пределах, ограниченных равновесной эпюрой влажности, сдвинутой вверх или вниз на величину, равную этому перемещению

$$\Delta z(W) = \Delta \xi. \quad (6.2)$$

Инструментальная погрешность измерения уровня грунтовых вод может быть доведена до $\Delta \xi = 1$ см. Это существенно меньше, чем допустимое отклонение расчетных эпюр влажности от вычисленных. Поэтому данный источник погрешности расчетов можно не учитывать.

Существенную роль могут играть только грубые методические ошибки, например:

1) скважина, наблюдения по которой используются для расчета, находится далеко от участка, где измеряется и вычисляется влажность;

2) труба скважины перфорирована по всей ее длине и заглублена на несколько метров ниже УГВ;

3) для измерения УГВ используется не скважина, дно которой находится вблизи зеркала грунтовых вод, а пьезометр (труба, заглубленная на несколько метров ниже УГВ и перфорированная только в нижней своей части).

Если в любом из подобных случаев произведена оценка методической погрешности измерения УГВ, то, подставляя $\Delta \xi$ в выражение (6.2), можно оценить сдвиг по вертикали эпюры влажности, обусловленный этим источником ошибок.

Стационарное распределение влаги в почве

Если уровень грунтовых вод находится в нескольких метрах от поверхности почвы в течение нескольких суток и поток влаги через поверхность мало изменяется, то устанавливается распределение влажности, близкое к стационарному.

Из расчетного уравнения

$$c(p) \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial k}{\partial z} \quad (6.3)$$

и краевых условий

$$z = 0; \quad q = -k \frac{\partial p}{\partial z} + k = \text{const}; \quad (6.4)$$

$$z = \xi; \quad p = 0 \quad (6.5)$$

легко находится следующее *стационарное* решение уравнения

$$\xi - z = \int_p^0 \frac{dp}{1 - \frac{q_0}{k(p)}}. \quad (6.6)$$

Уравнение (6.6) показывает, что при данной фиксированной функции $k(p)$ профиль *потенциалов* в зоне аэрации *не зависит* от вида основной гидрофизической характеристики $p(W)$. Это дает нам простой метод анализа ошибок расчета влажности на ЭВМ: вначале можно найти ошибку определения потенциалов как функцию погрешности измерения или вычисления q_0 и $k(p)$; ошибка, возникающая при переходе от профиля потенциалов к эпюре влажности, определяется только погрешностью $p(W)$.

Рассмотрим теперь, как зависит ошибка вычисления потенциалов от q_0 и k . Погрешность, вносимая одной из этих исходных величин, зависит от величины другой. При малых q_0 влияние на решение второго члена знаменателя мало, и даже весьма боль-

шие ошибки не будут играть существенной роли. Физически это объясняется тем, что при $q_0 \rightarrow 0$ стационарное решение (6.6) приближается к равновесному (6.1), а статическое распределение влажностей и потенциалов не зависит от влагопроводности почвы.

Аналогично, при больших $k(p)$ влияние погрешности определения q_0 очень мало, потому что достаточно очень небольшого изменения профиля потенциалов, чтобы компенсировать значительное изменение q_0 . Отсюда следует, что чем ближе к поверхности залегают грунтовые воды и чем более проницаема почва, тем меньше ошибка определения q_0 влияет на точность расчетов на ЭВМ. Это указывает на целесообразность внедрения методики рационализации наблюдений за влажностью почвы в первую очередь на орошаемых массивах и в районах с высоким уровнем грунтовых вод даже при значительных ошибках определения $k(W)$ и q_0 .

Квазистационарное движение влаги при постоянной интенсивности дождя

Точные лабораторные и полевые опыты показывают [9, 10, 90], что при свободной (безнапорной) инфильтрации воды в почву в промоченной зоне действует уравнение

$$q_0 \approx k(W). \quad (6.7)$$

Справедливость этого приближенного уравнения была подтверждена также теоретическим исследованием параболической нелинейной модели движения влаги в почве методом численных опытов и путем применения аналитического аппарата [115].

Воспользуемся уравнением (6.7), чтобы получить количественную оценку ошибки расчетной влажности, обусловленной погрешностью исходных данных о интенсивности дождя. Как известно, влагопроводность почвы в этих условиях довольно хорошо описывается уравнением

$$k(W) = k_0 \left(\frac{W - B3}{PB - B3} \right)^n. \quad (6.8)$$

Подставляя (6.8) в (6.7), логарифмируя и дифференцируя, находим

$$\frac{dW}{W - B3} = \frac{d(PB - B3)}{PB - B3} - \frac{1}{n} \frac{dk_0}{k_0} + \frac{1}{n} \frac{dq_0}{q_0} + \frac{d(B3)}{W - B3}$$

и получаем следующую формулу для относительной ошибки расчетного значения

$$\frac{\Delta W}{W} < \frac{1}{n} \frac{\Delta k_0}{k_0} + \frac{1}{n} \frac{\Delta q_0}{q_0} + \frac{\Delta PB}{PB - B3} + \frac{\Delta B3}{W - B3}. \quad (6.9)$$

Показатель степени n обычно [9] близок к четырем. Формула (6.9) показывает, что если гидрофизические параметры поч-

вы (B_3 , PB , k_0) определены достаточно точно, то даже при относительной погрешности измерения потока воды через поверхность (интенсивности дождя) в 40%, рассчитанная влажность почвы будет иметь ошибку, не превышающую 10% (т. е. укладываемую в допустимые пределы). Таким образом, в ряде случаев метод расчета мало чувствителен к погрешности исходных метеоданных.

Аналогично вклад погрешности определения k_0 в относительную ошибку расчета влажности уменьшается множителем 0,25 в формуле (6.9).

Результаты приближенного анализа еще раз показывают большое значение точности определения характеристик почвы. Очевидно, что ошибки определения свойств почвы могут свести на нет все усилия специалистов, работающих над усовершенствованием физико-математических моделей движения почвенной влаги.

Хорошо известно, что коэффициент фильтрации почвы, вычисленный с помощью одной из эмпирических формул (как функция других свойств почвы) или измеренный «вблизи» данного участка, может дать ошибку на целый порядок. Уже при $\Delta k_0/k_0 = 100\%$ формула (6.9) дает $\Delta W/W \geq 25\%$, что превышает допустимую ошибку расчета. Таким образом, расчет профилей влажности во время поливов лимитируется точностью определения коэффициента фильтрации.

Аналогичные оценки для случая восходящего потока влаги при испарении можно получить из формулы (6.6) с той только разницей, что коэффициенты при $\Delta k_0/k_0$ и $\Delta q_0/q_0$ будут зависеть от отношения q_0/k_0 таким образом, как это описано в предыдущем разделе.

Возможность применения оценок погрешности, основанных на стационарном решении уравнения (6.3), следует из того, что в большинстве практических расчетов испарение с поверхности почвы измеряется или рассчитывается достаточно точно только за весьма длительные периоды (декады, месяцы). Поэтому в расчет вводится одна и та же величина испарения, средняя за данный период. В эти периоды распределение влаги в почве часто бывает очень близким к стационарному; обычно в эти же периоды производятся полевые измерения влажности, потому что в дождливую погоду бурение на влажность запрещено Наставлением Гидрометслужбы.

Пределы применимости простейших оценок погрешности и направление поиска при численных опытах на ЭВМ

Очевидно, что применимость полученных оценок определяется тем, насколько режим влажности в данном слое почвы близок к стационарному.

Чем ближе к поверхности находится слой почвы, чем больше изменчивость во времени потока через поверхность почвы, чем меньше коэффициент фильтрации почвы, тем вероятнее, что полученные оценки будут превышены.

Это определяет направление численных опытов по исследованию влияния погрешности исходных данных на точность расчета эпюр влажности почвы. По-видимому, нет смысла исследовать влияние погрешности уровня грунтовых вод, дающей относительно малый вклад в общую ошибку расчета.

Отпадает также необходимость проводить численные опыты с профилями влажности для уровня грунтовых вод, залегающего ниже 5—6 м. Такие расчеты требуют больших затрат машинного времени, так как резко увеличиваются количество узлов сетки и объем информации, выводимой на печать. Но они почти ничего не дают, поскольку ниже 1—2 м распределение влажности близко к стационарному (и даже к равновесному), и точность расчета эпюр в основном лимитируется погрешностью определения основной гидрофизической характеристики.

Не имеют пока смысла и численные опыты при разных $p(W)$ — во всяком случае до тех пор, пока не будут получены данные о статистической изменчивости этой характеристики.

Таким образом, наиболее перспективны численные опыты по исследованию влияния погрешности k_0 и q_0 на точность расчета на ЭВМ влажности почвы при сильно изменяющихся во времени метеорологических условиях. Имеет смысл проведение таких расчетов не за короткие интервалы, а в течение возможно более длительных промежутков времени с тем, чтобы охватить периоды с разной изменчивостью метеоусловий и накопить достаточное для статистической обработки количество данных.

2. ЧИСЛЕННЫЕ ОПЫТЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Во всех случаях, когда имеются сомнения в достаточной точности исходных данных, следует проводить специальные численные опыты. Лучше всего проводить несколько параллельных численных опытов с исходными данными, полученными из разных источников, по разным методикам.

Если такие данные не удастся получить, надо просто изменить «подогреваемый» массив исходных данных на величину предполагаемой погрешности и повторить расчет. Полезны также опыты, в которых задается максимально возможное (исходя из физических соображений) отклонение.

Здесь приведем только два примера из большого количества аналогичных численных опытов, проведенных А. П. Вершининым, Л. Г. Гусевой и Л. Л. Журавлевой. Но этого достаточно для того, чтобы понять технику таких расчетов и методику сравнения их.

Влияние точности определения испарения с поверхности почвы

Кажется странным, что по значениям испарения, которые могут иногда иметь относительную ошибку до 20—30%, удается рассчитать влажность со значительно меньшей относительной погрешностью. Это объясняется следующими причинами.

Во-первых, при распределении влаги, близком к равновесному, ошибка расчета испарения почти не влияет на точность расчета влажности. Все определяет водоудерживающая способность почвы.

Во-вторых, влияние испарения на режим влажности не особенно велико при режиме близком к стационарному, высокой влажности почвы, неглубоком уровне грунтовых вод или просто при градиентах много меньших единицы. Это следует из формулы (6.6).

В-третьих, как это видно из формулы (6.9), при относительной ошибке испарения в 20% относительная погрешность в вычислении влажности будет только 5%. А это всегда меньше погрешности измерения весовым методом с четырехкратной повторностью.

Но все эти выводы получены с помощью приближенного анализа некоторых простейших аналитических решений. Целесообразно проверить их с помощью численных опытов для реальных условий [69].

На рис. 31 приведены эпюры влажности: наблюдаемые, вычисленные при измеренном испарении и при введении в ЭЦВМ массива испарения, рассчитанного с помощью методики [89].

Хотя введение в расчет испарения, вычисленного по температуре и влажности воздуха, дает несколько отличающиеся результаты, видно, что по сравнению с ошибкой самих измерений расхождения невелики.

Такие результаты типичны для орошаемых полей и зоны достаточного увлажнения, где УГВ находится близко от поверхности.

Это означает, что данный метод расчета может найти применение в системах автоматического регулирования водного режима орошаемых и осушаемых полей. При этом можно использовать хорошо разработанные датчики температуры, влажности воздуха и УГВ вместо ненадежных и дорогостоящих устройств для непрерывного измерения влажности почвы.

Влияние начальных условий

Расчеты на ЭВМ производились по методике, описанной выше, при трех различных начальных условиях [22]. В первом варианте расчет велся по эпюре влажности, наблюдаемой в поле, во втором — принималось, что начальная влажность всех слоев

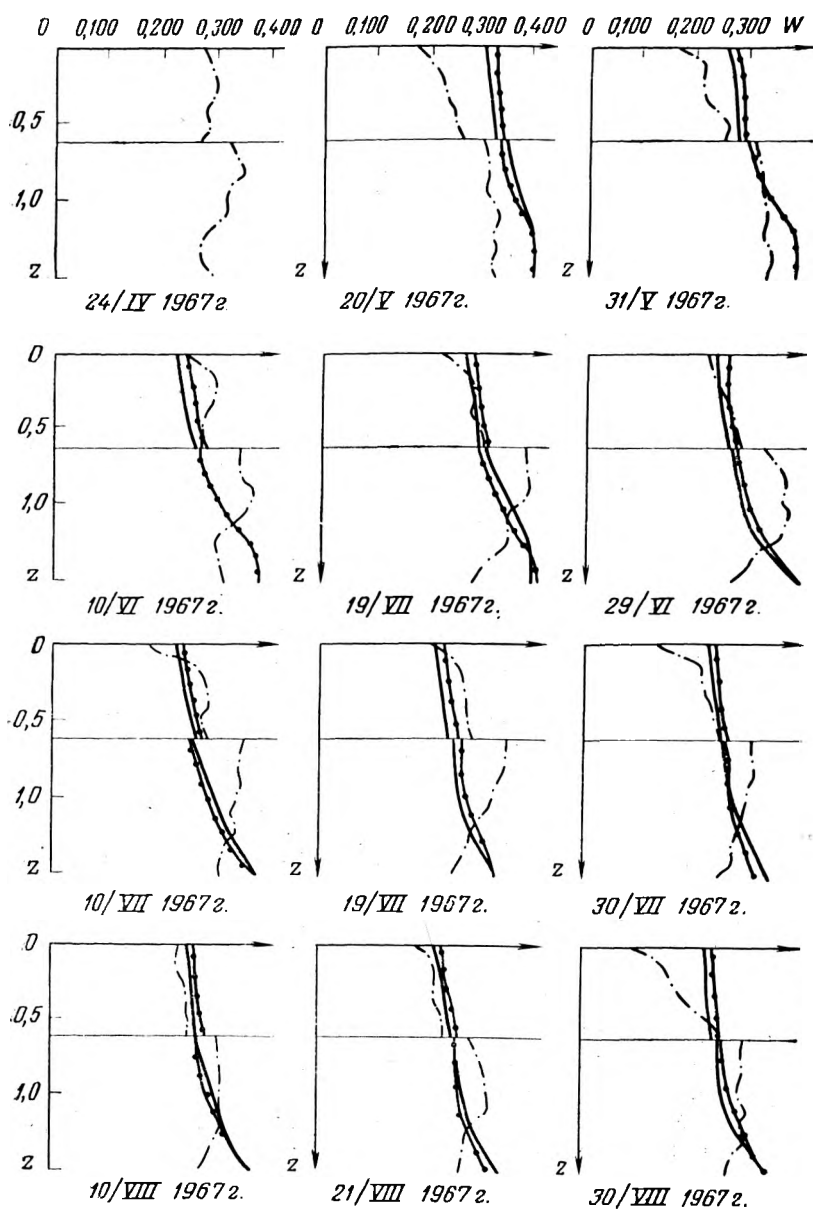


Рис. 31. Эпюры влажностей почвы.

1 — измеренные в поле весовым методом с четырехкратной повторностью; 2 — вычисленные на ЭВМ с учетом измеренного испарения; 3 — вычисленные на ЭВМ с учетом испарения, рассчитанного по температуре и влажности (3)

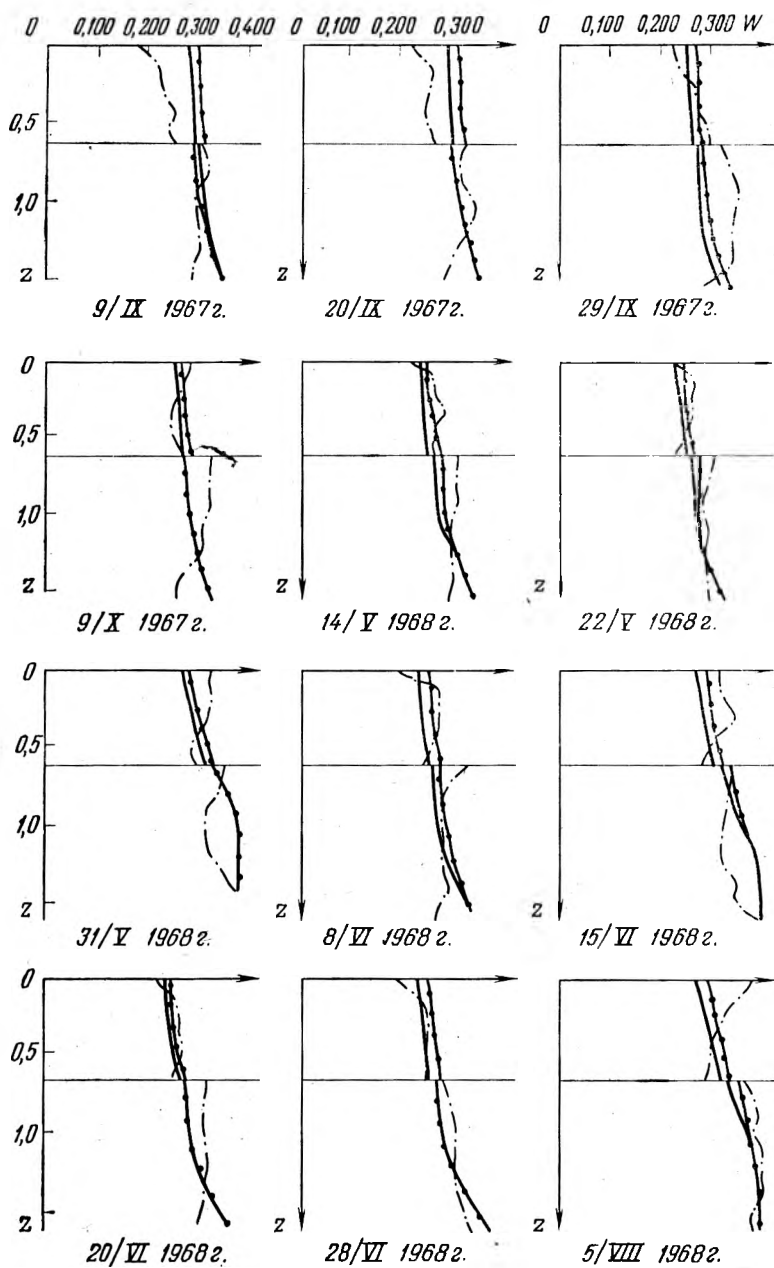


Рис. 31 (продолжение)

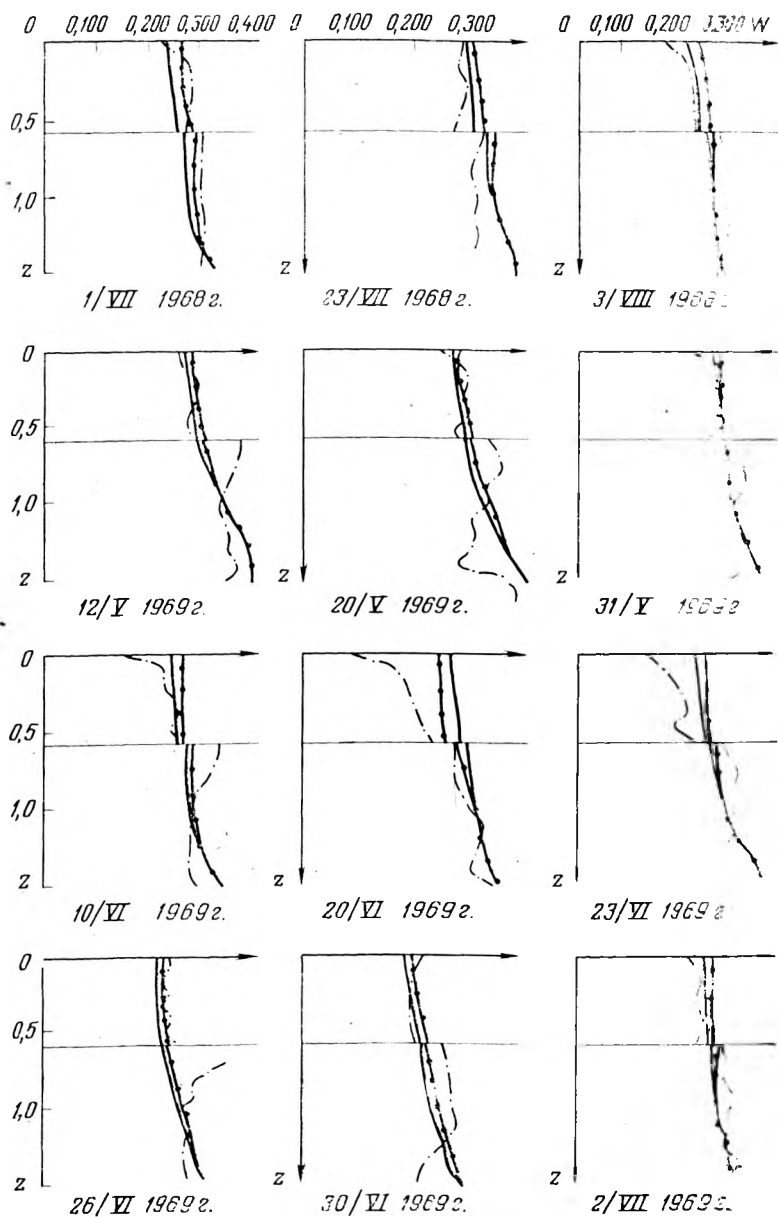


Рис. 31 (продолжение)

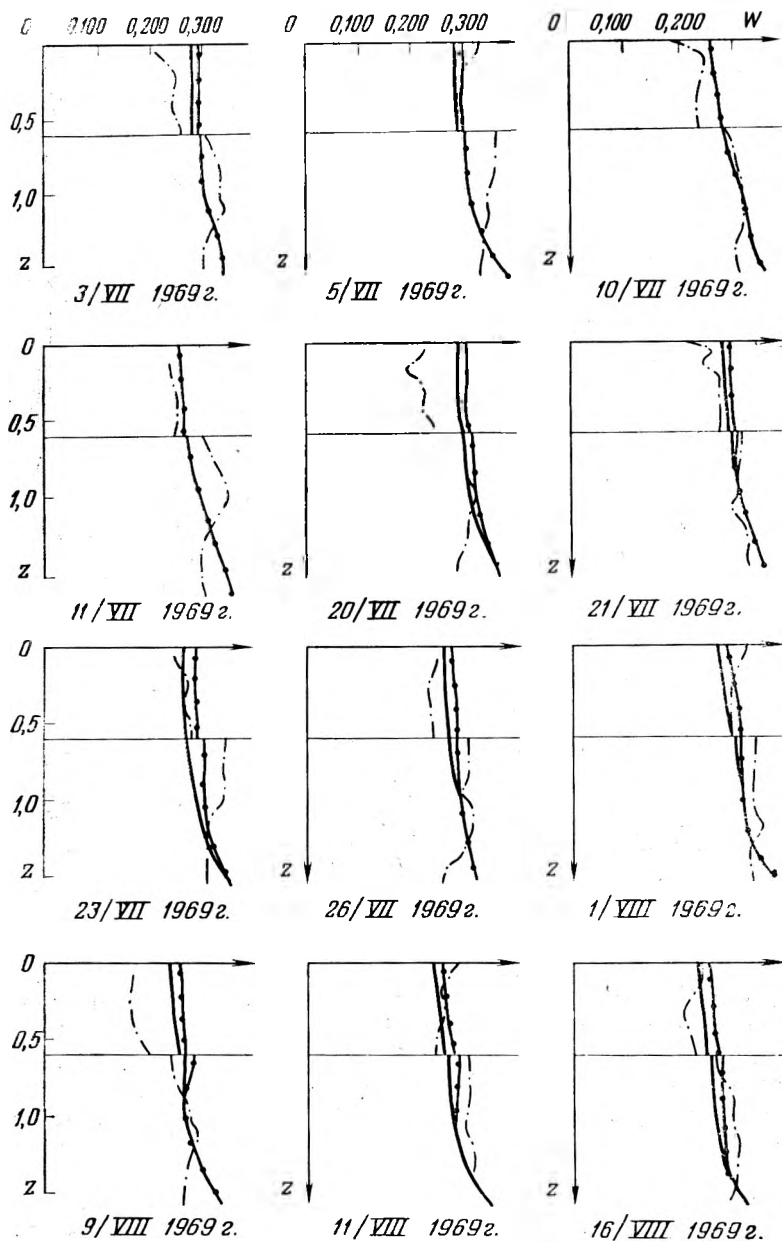


Рис. 31 (продолжение)

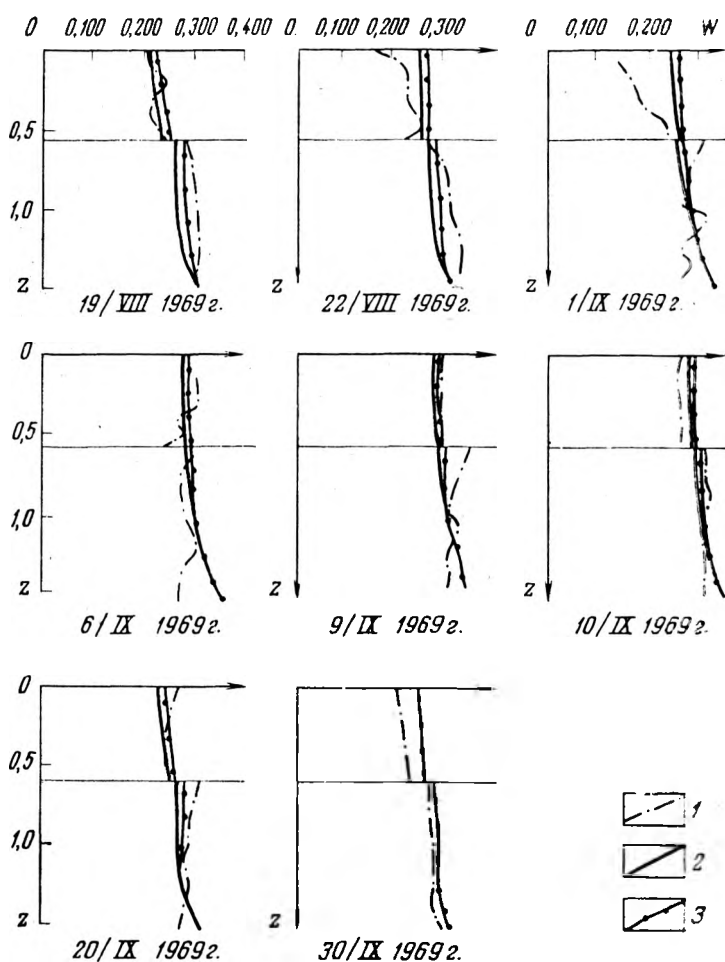


Рис. 31 (продолжение)

ючвы равна полной влагоемкости, в третьем — что капиллярно-сорбционный потенциал всех слоев почвы равен 16 м вод. ст. (что примерно соответствует ММВ данной почвы). Во всех трех вариантах программа расчета на ЭВМ и данные об испарении, осадках, поливах и уровне грунтовых вод были одинаковыми.

Как видно из рис. 32 и 33, во всех трех вариантах через 25—30 сут все восемь значащих цифр вычисленных значений влажности стали совпадать. Компенсация отклонений, обусловленных различием начальных условий, происходит наиболее быстро во втором варианте. Преуменьшение начальных влажностей компенсируется значительно медленнее.

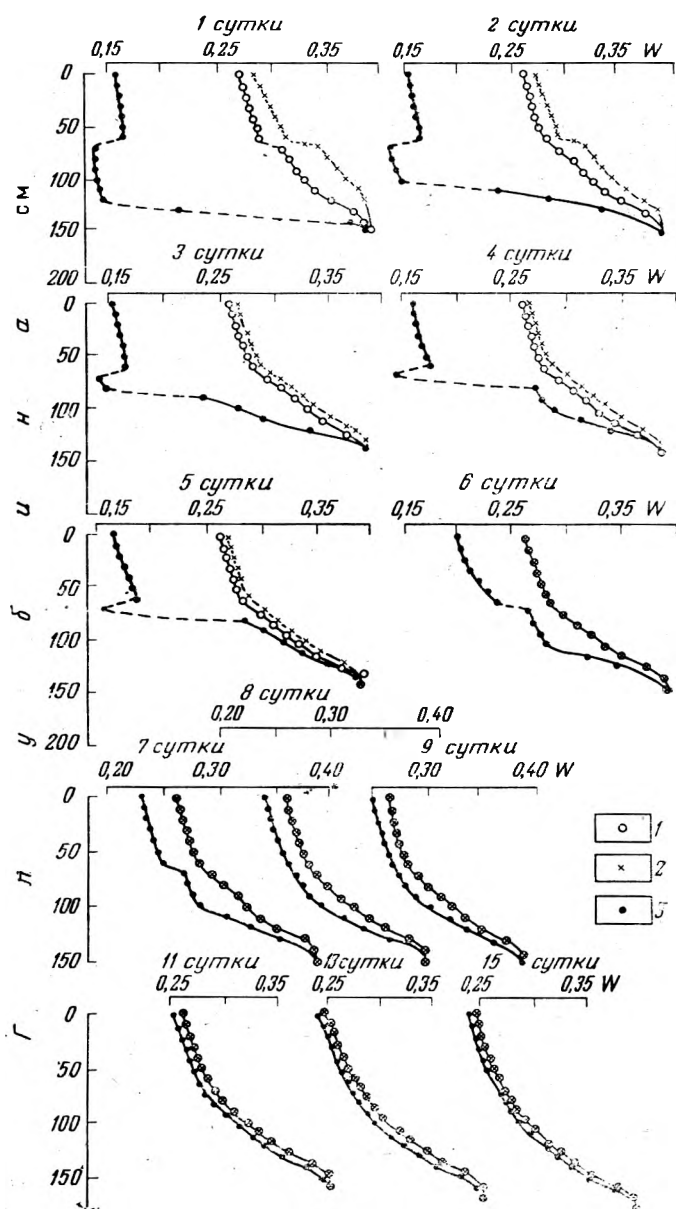


Рис. 32. Распределение влажности по глубине в разные моменты времени.

1 — расчет по наблюдаемым начальным условиям; 2 — влажность в начальный момент, равная полной влагоемкости; 3 — «сухие» начальные условия

Физический смысл наблюдающейся компенсации следует искать в закономерностях влагообмена зоны аэрации с грунтовыми водами. Если мы зададим преувеличенные значения начальной влажности (как во втором варианте), то преувеличенными будут и потенциалы в зоне аэрации, а следовательно, и перепад потенциалов между зоной аэрации и грунтовыми водами. Усиится отток в грунтовые воды или же уменьшится подпитывание зоны аэрации снизу. Аналогично, преуменьшение начальных влажностей будет приводить к противоположным компенсирующим эффектам.

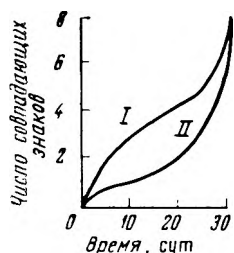


Рис. 33. Увеличение со временем количества десятичных знаков совпадающих в «мокром» (I) и «сухом» (II) вариантах расчета по сравнению с контролем (наблюдаемые начальные условия)

Скорость компенсации больше во втором варианте, чем в первом, отчасти за счет того, что гравитационные силы направлены вниз. Способствуя оттоку в грунтовые воды, они замедляют подпитку. Кроме того, определенную роль играет то, что влагопроводимость грунта в «сухом» варианте меньше, чем в «моком».

Для прикладных задач, по-видимому, достаточно точность расчетов, обеспечивающая правильность *первых трех значащих цифр*. Как видно из рис. 32 и 33, это достигается в данных условиях уже через 10–20 сут.

Имеющиеся в настоящее время ряды наблюдений за влажностью почвы весьма коротки с частыми перерывами. Кроме того, очень мало наблюдений, которые проводились систематически, на одних и тех же участках в течение многих лет. Для расчета обеспеченности неблагоприятного увлажнения (при мелиорации) и разработки некоторых методик гидрологических прогнозов часто требуется восстановить или удлинить ряды наблюдений так, чтобы получить непрерывные данные за несколько десятилетий. Хотя использование описанной выше методики для решения этих задач в принципе возможно, продолжительность таких расчетов довольно велика. Например, на ЭВМ БЭСМ-4 расчет одного года занимает несколько часов машинного времени. Применение более сложных моделей может в некоторых случаях увеличивать затраты машинного времени на несколько порядков.

Продолжительность расчетов может быть в некоторой степени уменьшена за счет использования ЭВМ, обладающих боль-

шим быстродействием. Однако рост быстродействия происходит сейчас значительно медленнее, чем усложнение физико-математических моделей.

Полученные выше результаты позволяют предложить (по крайней мере для легких грунтов) другой эффективный прием уменьшения продолжительности расчетов. В настоящее время появились вычислительные системы, состоящие из 10 и более ЭВМ-спутников, связанных между собой и способных выполнять расчеты одновременно [26]. Применяя такую систему, можно заставить каждую из машин-спутников рассчитывать режим влажности за короткий интервал времени, принимая некоторые фиктивные начальные условия и отбрасывая начальный период, равный времени компенсации.

Пусть необходимо просчитать T лет. Разбивая расчетный интервал на N кусков и выбрасывая из результатов расчета каждого куска неверные данные за время компенсации τ , удастся провести вычисления за время

$$t = (T/N + \tau) M, \quad (6.10)$$

где M — машинное время, необходимое для расчета влажности за единицу календарного времени.

Например, при необходимости провести расчеты за 30 лет на вычислительной системе, состоящей из 10 машин-спутников, получим для поля Таласского орошаемого массива ($\tau \leq 0,05$ г)

$$t = \left(\frac{30}{10} + 0,05 \right) M = 3,05 M, \quad (6.11)$$

в то время как при расчете шаг за шагом

$$t = 30 M, \quad (6.12)$$

т. е. продолжительность расчета уменьшится почти в 10 раз.

Из формул (1.11) и (6.10) следует

$$t = \left(\frac{T}{N} + \varphi \frac{\xi}{k_0 \gamma} \right) M \approx \left(\frac{T}{N} + \frac{0,3 \xi}{k_0 \gamma} \right) M. \quad (6.13)$$

Формула (6.13) является, конечно, такой же приближенной как и (1.11). Значение коэффициента φ зависит от многих факторов, в частности, от величины потоков, создающих тот или иной капиллярно-сорбционный потенциал $p_{гр}$ на поверхности почвы. Однако эти формулы предназначены не для точных расчетов, а для грубой оценки возможности применения описанных выше приемов.

Для проверки применимости этих формул были проведены численные опыты с теми же тремя вариантами начальных условий, но для грунтов с коэффициентами фильтрации, меньшими в 2 раза и большими в 2, 10 и 100 раз. Как видно из рис. 34, изме-

ние времени компенсации, необходимого для обеспечения трех значащих цифр, весьма удовлетворительно оценивается помощью формул, приведенных в разделе 6 главы 1. В частности, при увеличении коэффициента фильтрации в 100 раз компенсация достигается уже в течение первых суток от начала счета.

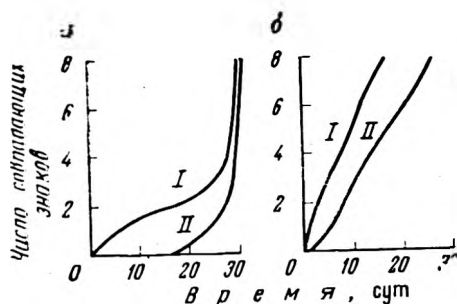


Рис. 34. Увеличение со временем количества десятичных знаков, совпадающих в «мокром» (I) и «сухом» (II) вариантах расчета, по сравнению с контролем (наблюдаемые начальные условия) при уменьшенных (а) и увеличенных (б) в два раза коэффициентах фильтрации

Отметим, что в подобного рода оценках целесообразно ориентироваться именно на три значащие цифры. Такая точность достаточна почти для всех гидрологических расчетов. Время компенсации первой и второй значащих цифр определяется менее точно, а четвертая и последующие цифры являются в большей степени индикатором устойчивости численного метода относительно изменения начальных данных.

3. НЕСОВЕРШЕНСТВО МОДЕЛИ

Расчеты по описанной в главе 1 простейшей модели влагопереноса вначале проводились с большой осторожностью. Полученные данные сопоставлялись с полевыми опытами и наблюдениями, а отклонения тщательно анализировались.

Вначале любые отклонения пытались объяснить прежде всего учетом каких-либо дополнительных механизмов процесса. Однако элементарный логический анализ каждый раз показывал, что физика процесса тут ни при чем. Отклонения были обусловлены чаще низкой точностью полевых наблюдений и измерений. Постепенно стали в первую очередь проводить статистический анализ и сравнивать расхождения с погрешностью опытных данных, как это описано в главе 4.

Время от времени обнаруживались очень большие статистические значимые отклонения. Однако и в этих случаях анализ исходных данных каждый раз показывал, что причина — ошибки в измерениях. Но уже не случайные, а грубые методические или систематические. Примеры таких расхождений по одному из районов приведены в главе 5.

Нужно сказать, что для такого рода анализа совершенно необходим очень тесный контакт со специалистами, которые непосредственно участвовали в полевых измерениях. Часто ошибки

(в особенности методические) обнаруживаются только при просмотре первичных записей (книжек), выполненных непосредственно в ходе полевых работ. При последующей обработке и вычислении водного баланса все эти неточности настолько «маскируются», что обнаружить их довольно трудно.

Влияние растительности

Поля, по которым велись сопоставления, представляют собой не пустыню, не глинистую пасту, вроде той, которую применяют для точных лабораторных опытов, и даже не пар или залежь. Это обычные колхозные поля, типичные для данного региона. На них не просто «имеется растительность», с них собирается урожай. Например, в табл. 6 приведены данные о составе культур для одного из районов.

Неоднократно высказывалось предположение, что расчет по простейшей модели на участке с растительностью должен давать заметные отклонения от опытных данных. Однако даже очень тщательный анализ не обнаруживает *статистически значимых* отклонений расчета от наблюдений.

Причины этого весьма разнообразны. Во-первых, влияние растительности в некоторой степени учитывается тем, что в расчет вводится суммарное испарение, включающее как физическое испарение, так и транспирацию.

Во-вторых, влияние растительности аналогично действию некоторого гидравлического сопротивления, подключенного параллельно гидравлическим сопротивлением самой почвы. Пока влажность высокая это влияние, по-видимому, незначительно. Когда становится очень сухо, растение гибнет. Наиболее сильно эффект влияния растительности должен обнаружиться на поле, где растения находятся как бы «на грани гибели» или, во всяком случае, очень сильно снижают продуктивность и урожай.

В-третьих, растение, по-видимому, значительно лучше «понимает» почву, чем человек. Отношения их скорее напоминают симбиоз, чем эксплуатацию. Поэтому можно предположить, что растение ведет отбор влаги из почвы так, чтобы минимально нарушать естественный водный режим. В периоды переувлажнения большая часть растений просто гибнет вместо того чтобы активно способствовать изменению водного режима почвы путем «организации дренажа». Аналогично, в период сильных засух большая часть растений выгорает; благодаря этому достигается сохранение влаги в почве, т. е. условия, более близкие к «ненарушенному» режиму окружающей среды.

Выработанный в ходе эволюции, этот режим «защиты окружающей среды» обеспечивает благоприятные условия для развития следующих поколений.

Возможно, однако, что в начале засушливых периодов эта гармония нарушается, и прежде чем погибнуть, растение суще-

ственно изменяет водный режим почвы, действуя корнями достаточно грубо.

Во всяком случае, пока мы не имеем достоверных данных, позволяющих утверждать, что статистически значимые отклонения действительно наблюдаются в полевых условиях из-за деятельности растительности.

Чтобы оценить порядок эффектов, вызываемых действием растительности, были поставлены специальные лабораторные опыты [80], в которых корневая система моделировалась пористыми керамическими трубками. Через стенки трубок производился отсос воды из почвы. Оказалось, что эти изменения не только меньше погрешности полевых наблюдений, но даже ниже точности определения гидрофизических характеристик почвы.

Проводились также параллельные численные опыты по методике типа описанной выше и специальным моделям, в которых явно (в виде распределенных источников) учитывалось влияние корневой системы. Результат получился такой же.

По-видимому, учет растительности не существует в прикладных расчетах водного режима зоны аэрации. Однако модели с явным учетом корневой системы очень полезны для решения других задач (биология, растениеводство, прогноз урожая и др.).

Гистерезис

При расчете потоков влаги за очень *короткие* периоды (12 ч, сутки) были замечены некоторые расхождения в периоды, когда выпадают сильные дожди или производятся поливы.

Грубо говоря, расчет дает более сглаженный ход потока, падающего в грунтовые воды. Обнаруживается также, что почва как будто проявляет большую водоудерживающую способность после дождя или полива, чем это должно быть по расчету.

Автор предполагает, что это может быть вызвано гистерезисом ОГХ. Но пока это не удалось подтвердить достаточно точным статистическим анализом расхождений расчетов и полевых опытов.

Эпюры влажности вычисляются в пределах точности измерений. А расчеты потоков влаги за суточные интервалы времени весьма ненадежны, потому что исходные данные за такие короткие периоды определяются очень неточно. Испарение за сутки может иметь ошибку до 100%; погрешности примерно такого же порядка могут иметь и осадки.

Попытка использовать для этих исследований лизиметры также не дала достоверных результатов. Обнаруженные во многих случаях достаточно большие расхождения оказались обусловленными плохой работой подпитывающих устройств лизиметров.

Подпитывающие устройства, работающие примерно так, как карбюратор автомобильного двигателя, отказывают, засоряясь

на время или навсегда грязью. Регуляторы с резиновой мембраной обладают малой инерционностью и хорошо работают до тех пор, пока мембрана новая, гибкая. Однако, полевые исследования продолжаются годами, лизиметры остаются на зиму под открытым небом. Очень надежны устройства типа сосуда Мариотта с достаточно широкими трубками, но они инерционны и подают воду отдельными скачками.

Обусловлены ли эти расхождения техникой опыта или физикой процесса, пока установить невозможно. Необходимы специальные, более точные полевые опыты и исследования.

Отметим, что для *прикладных* расчетов водного режима зоны аэрации вычисление потоков за очень короткие промежутки времени не имеет обычно практического значения. Чаще всего нет и достаточно точных исходных данных для таких расчетов. А потоки влаги за периоды порядка декады получаются достаточно близкими к наблюдаемым.

Зимний режим

В течение последних лет многочисленные проверочные и прикладные расчеты всегда давали хорошее совпадение с натурой. В частности, хорошие результаты были получены для Белоруссии [1, 6, 20, 80], Ростовской области [2, 100, 101], Грузии [12], Ленинградской области [36—38], Казахстана [29, 42, 52, 53, 57, 58, 67, 69, 71, 81, 84], Сибири [17] и других районов для песков, супесей, легких и тяжелых суглинков, торфяных почв и даже торфяной залежи.

Однако недавно были обнаружены случаи, когда описанный выше метод расчета дает *существенные*, статистически значимые отклонения от наблюдений в четырехкратной повторности. Отклонения настолько большие и систематические, что нет смысла даже приводить графики. На всех одна и та же картина: вычисленные значения *всегда меньше*, чем измеренные, иногда в 2—3 раза. Эти расхождения наблюдаются в *холодные* зимы при температуре воздуха ниже минус 5—10°C. Причина их — неучет влагопереноса в промерзающей почве под действием градиента температуры.

Сейчас ведется интенсивная разработка более совершенной методики, позволяющей вести расчеты и в этих условиях. Но трудности пока очень велики. Несмотря на большое количество исследований, до сих пор нет удовлетворительного понимания физического механизма, вызывающего перенос влаги в промерзающем грунте.

Из предыдущих глав мы видели, что успеху разработки данной методики в значительной степени способствовали многолетние экспериментальные и теоретические исследования инфильтрации воды в почву. За исключением нескольких экспериментальных работ таких исследований для инфильтрации воды в

мерзлый грунт не было. В течение нескольких последних лет удалось построить такую теорию, сопоставить ее с экспериментом, начать численные опыты на ЭЦВМ.

Возникает также ряд трудностей, связанных с особыми процессами, идущими в мерзлом грунте (образование ледяных пробок, морозное пучение).

В главе 2 мы видели, что уже для простейших уравнений существует ряд математических проблем, которые фактически не решены до конца. Они проявляются еще более остро при расчете теплооблагоденоса. Вычисления становятся более громоздкими и их приходится вести с еще меньшим шагом по времени. Пригодными для таких расчетов оказываются практически только наиболее мощные ЭЦВМ типа БЭСМ-6, ЕС-1060.

Очень мала информация о гидрофизических характеристиках почвы при отрицательных температурах. Наблюдения за влажностью во время морозов либо вообще не ведутся, либо проводятся один-два раза за зиму, так что материала для сопоставлений очень мало.

Несмотря на все эти трудности, работа в данном направлении продолжается. Однако маловероятно, что в ближайшее время удастся создать методику прикладных расчетов, надежно работающую в зимний период.

Пока же придется ввести ограничение, запрещающее применять описанную выше методику при устойчивых температурах воздуха ниже минус 5—10°C.

Во многих прикладных расчетах это ограничение не существенно. Большая часть наблюдений за водным режимом почв по-прежнему и проводится летом, что таковы основные потребности инженерной и агрономической практики.

Выше был описан простейший комплекс, состоящий из теории, методики определения исходных данных, способа вычисления на ЭВМ и техники сопоставления результатов расчета с наблюдениями в естественных условиях. По-видимому, это первый подобного рода комплекс и потому, естественно, не самый лучший.

Интересно обсудить некоторые возможности развития и улучшения. Выделим условно два основных направления: усложнение и усовершенствование.

Возможности усложнения очевидны. Вот по крайней мере три группы более полных моделей; некоторые из них уже реализованы на наиболее мощных из современных ЭВМ [56].

1. Физически более глубокие модели, учитывающие ряд тонких механизмов изотермического влагопереноса, например геологические свойства поровой влаги, гистерезис, изменение структуры почвы и т. д.

2. Многокомпонентные модели, учитывающие взаимодействие движения влаги и переноса тепла, солей, газов, электромагнитные поля и др.

3. Пространственные двумерные и трехмерные модели на больших территориях, включающие атмосферу и грунтовые воды.

Развитие этого направления идет сейчас очень быстро и полезность его несомненна. Однако почти любое из описанных выше усложнений приводит к тому, что задачу не удастся решить на стандартных ЭВМ или же требуется слишком много машинного времени.

Непрерывное усовершенствование ЭВМ рано или поздно приведет к тому, что расчеты по усложненным моделям станут доступны для всех. Но это будет не скоро. Хотя эволюция ЭВМ идет довольно быстро, смена всего парка ЭВМ в масштабах страны занимает 10—15 лет.

Еще более медленно прогрессирует доступность расчетов на наиболее мощных ЭВМ в масштабах планеты. Например, уже сейчас эксплуатируются ЭВМ с быстродействием порядка 10^8 операций в секунду и колоссальной памятью. Однако большая часть инженеров и ученых не имеют пока возможности пользоваться ими в своей повседневной работе. Поэтому не следует использовать усложненные модели для разработки методики *прикладных* расчетов. Только в отдельных случаях организации, оснащенные мощной вычислительной техникой, могут разрабатывать для себя уникальные алгоритмы и программы.

В данной книге, посвященной технике прикладных расчетов, доступных почти всем, мы не описываем такие модели. Предполагаем посвятить им отдельную книгу, рассчитанную больше на изобретчиков, чем на потребителей.

Другое основное направление — *усовершенствование*. Под этим мы понимаем такое развитие, которое уже сейчас (при той вычислительной технике, которая эксплуатируется везде) может обеспечить увеличение точности, надежности, полноты и удобства прикладных расчетов.

Вот некоторые из основных задач, которые предстоит решить.

1. Разработка методики определения (съемок) свойств почвогрунтов на обширных территориях аэрокосмическими методами. Точность расчетов почти полностью лимитируется качеством данных о свойствах почвы. А чаще всего никаких данных просто нет.

2. Разработка экономичного метода вычисления, гарантирующего заданную точность.

Ни один из существующих алгоритмов не позволяет уверенно утверждать, что при таком-то шаге отклонение результатов расчета от точного решения уравнений будет *заведомо* меньше заданной величины.

Требования инженеров довольно скромны. Для прикладных расчетов достаточно гарантировать относительную ошибку порядка 0,1—1%. Но необходима уверенность, что во всех узлах пространственно-временной сетки ошибка за счет вычислений не будет большей.

Как минимум, необходимы программы, которые выдавали бы на печать не только результаты расчетов, но и ошибки, возникающие вследствие приближенности самих вычислений.

3. Разработать технику представления результатов расчета в обозримом, точном, наглядном и полезном виде.

Некоторую помощь в этом могут оказать дисплеи, графопостроители и другие подобные устройства, позволяющие представлять результаты расчетов в виде графиков и телефильмов. Однако задача не исчерпывается внедрением всей этой новой техники. Расчет на ЭВМ дает громадное количество цифр и графиков. Некоторые из них нужны одним специалистам, другие — другим. Только совместная работа потребителей и разработчиков может показать какие именно данные и в каком виде действительно окажутся полезными.

По-видимому придется разработать ряд совершенно новых и необычных видов оформления.

4. Массовое сравнение результатов расчета с натурными наблюдениями.

Такая работа должна проводиться совместно со специалистами по полевым исследованиям, изысканиям и наблюдениям. Суть ее заключается в глубоком анализе природы возникающих отклонений расчета от наблюдаемых величин.

Чрезвычайно важно чтобы расчеты велись не через несколько лет после наблюдений, а почти одновременно. Для этого необходимо своевременное определение гидрофизических характеристик почвы.

Здесь, возможно, удастся обнаружить не только наиболее важные для прикладных расчетов пути развития, но и ряд направлений, о которых мы сейчас не подозреваем.

В отличие от усложненных, усовершенствованные модели можно было бы применять уже сейчас. К сожалению, пока их нет. Усовершенствовать много труднее, чем усложнять. Предстоит еще много сделать, прежде чем такие модели появятся.

Интересно, что любая из описанных выше задач усовершенствования рано или поздно возникнет и для любой усложненной модели. Так что лучше было бы решить их пораньше.

Список литературы

1. *Аверьянов С. Ф., Голованов А. Н., Никольский Ю. Н.* Расчет водного режима мелиорируемых земель. — Гидротехника и мелиорация, 1974, № 3, с. 34—41.
2. *Алимамедов М. Б., Сметанич Я. С., Якобс А. И.* Численный метод расчета влажности по глубине однородных почвогрунтов. — Докл. ВАСХНИЛ, 1965, № 10, с. 43—47.
3. *Аравин В. И., Нумеров С. Н.* Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М., Гостехиздат, 1953. с. 616.
4. *Афанасик Г. И.* Модель влагообмена в корнеобитаемом слое почвы. — Труды Агрофизического ин-та, 1971, вып. 32, с. 11—13.
5. *Афанасик Г. И., Армоник О. Р., Скворцов Н. Г.* Расчет водного режима почвы. — Мелиорация и водное хозяйство, 1976, № 3, с. 22—23.
6. *Афанасик Г. И., Армоник О. Р., Скворцов Н. Г.* Расчет водного режима мелиорированных почвогрунтов. — В кн.: Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем. Минск, 1976, с. 75—86.
7. *Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М.* Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., Недра, 1972. 288 с.
8. *Бондаренко Н. Ф.* Физика движения подземных вод. Л., Гидрометеониздат, 1973. 215 с.
9. *Будасовский А. И.* Впитывание воды в почву. М., Изд-во АН СССР, 1955. 139 с.
10. *Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С.* Физико-математические основы фильтрации воды. М., Мир, 1971. 451 с.
11. *Вазов В., Форсайт Дж.* Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. М., Изд-во иностр. лит. 1963. 487 с.
12. *Варазашвили Л. И.* Исследование и прогноз водного режима зоны аэрации Алазанского орошаемого массива. Автореф. дисс. Ереван, 1973, 23 с.
13. *Варазашвили Л. И., Лытаев И. А., Петрова М. В.* Статистические параметры влажности почвы как функция потенциала почвенной влаги. — Почвоведение, 1976, № 1, с. 66—72.
14. *Вериго С. А., Разумова П. А.* Почвенная влага. Л., Гидрометеониздат, 1973. 328 с.
15. *Волков А. С.* О репрезентативности лизиметрических наблюдений. — Труды Государственного гидрологического ин-та, 1971, вып. 170, с. 60—70.
16. *Георгиевский В. Б.* Универсальные алгоритмы для определения фильтрационных параметров. Киев. Наукова думка, 1971. 328 с.
17. *Гильманов Т. Г.* Математическая модель почвы как подсистемы в экосистеме луговой степи. Автореф. дисс. М., МГУ. 1976, 20 с.
18. *Глобус А. М.* Экспериментальная гидрофизика почв. Л., Гидрометеониздат, 1969. 335 с.
19. *Годунов С. К., Рябенкий В. С.* Разностные схемы. М., Наука, 1973. 401 с.
20. *Голованов А. И.* Прогноз водносолевого режима и расчет дренажа на орошаемых землях. Автореф. дисс. М., 1975. 32 с.
21. *Гроот С., Мазур П.* Неравновесная термодинамика. М., Мир, 1964. 456 с.
22. *Гусева Л. Г., Кулик В. Я.* Влияние начальных условий на точность расчета на ЭВМ гидрологического режима зоны аэрации. — Докл. ВАСХНИЛ, 1977, № 2, с. 40—41.
23. *Долгов С. И.* Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступности растениям. М., Изд-во АН СССР, 1948. 205 с.

24. Дружинин Н. И. Метод электродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации. М., Госэнергоиздат, 1956. 346 с.
25. Жернов И. Е., Шестаков В. М. Моделирование фильтрации подземных вод. М., Недра, 1971. 224 с.
26. Жоголев Е. А., Трифонов Н. П. Курс программирования. М., Наука, 1971. 339 с.
27. Журавлева Л. Л., Кулик В. Я. Упрощенный метод определения основной гидрофизической характеристики почв. — Метеорология и гидрология, № 10, 1977, с. 40—50.
28. Изотермическое передвижение влаги в зоне аэрации. Перевод с англ. Л., Гидрометеиздат, 1972. 168 с.
29. Использование простейшего теоретического метода расчета движения влаги в почве на ЭВМ для интерполяции, экстраполяции, вычисления средних и построения хронозонлет. В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Почвоведение, 1975, № 3, с. 123—128.
30. Качинский Н. А. Физика почв. М., Высшая школа, 1965. 318 с.
31. Ковда В. А. Основы учения о почвах. Кн. 1. М., Наука, 1973. 407 с.
32. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М., Наука, 1975. 227 с.
33. Коллинз Р. Е. Течение жидкостей через пористые среды. М., Мир, 1964. 349 с.
34. Константинов А. Р. Методика определения средних влагозапасов в почве за любой период времени с учетом выпавших осадков. — Метеорология и гидрология, № 6, 1963, с. 51—54.
35. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л., Гидрометеиздат, 1968. 532 с.
36. Корчунов С. С. Определение влагокоэффициентов торфа. — Труды Всесоюз. научно-исследовательского ин-та торфяной промышленности, 1956, вып. 13, с. 74—89.
37. Корчунов С. С. Методика использования гидронтегратора для расчета водного режима торфяной залежи. — Труды Всесоюз. ин-та торфяной промышленности, 1971, вып. 31, с. 10—17.
38. Корчунов С. С., Могилевский И. И., Абакумов О. Н. Изучение водного режима осушенных торфяных залежей. — Труды Всесоюз. научно-исследовательского ин-та торфяной промышленности, 1960, вып. 17, с. 1—102.
39. Кричевский М. Р. Понятия и основы термодинамики. М., Изд. ГНТИХЛ. 1962. 443 с.
40. Ксензов А. А. Определение влажности почвы с заданной точностью. — В кн.: Мелноративная наука — производству. Л., 1971, с. 122—126.
41. Ксензов А. А. О повторности определения влажности осушенных почв. — Почвоведение, 1971, № 2, с. 150—156.
42. Критический контроль лизиметрических наблюдений путем расчетов на ЭВМ по уравнениям движения почвенной влаги / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Докл. ВАСХНИЛ. 1974, № 3, с. 43—44.
43. Кулик В. Я. О характеристике влагозапасов почвы при воднобалансовых расчетах. — Труды Государственного гидрологического ин-та, 1966, вып. 135, с. 130—149.
44. Кулик В. Я. Влияние точности исходных данных на погрешность расчета на ЭВМ влажности почвы в зоне аэрации. — Почвоведение, 1974, № 4, с. 45—50.
45. Кулик В. Я., Пичугина Н. В. Одновременный расчет капиллярно-сорбционных потенциалов, влажностей, потоков влаги на ЭВМ по уравнениям движения почвенной влаги. — Докл. ВАСХНИЛ, 1973, № 4, с. 41—43.
46. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. М., Изд. АН СССР, 1936. 314 с.
47. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., Гостехиздат, 1947. 241 с.
48. Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование геофильтрации. М., Недра, 1976. 407 с.

49. Лыков А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М., Гостехиздат, 1954, 296 с.
50. Лыков А. В. Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло- и массообмена. — Инженерно-физический журнал, 1965, т. 9, № 3, с. 287—304.
51. Лыков А. В. Тепломассообмен. М. Энергия, 1972. 559 с.
52. Методика прикладных расчетов гидрологического режима зоны аэрации на ЭВМ по уравнениям движения почвенной влаги / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Труды 4 Всесоюз. гидрологического съезда, 1976, том 6, с. 107—115.
53. Методы расчета влагопереноса в зоне аэрации (методические указания). Составители В. А. Злотник, В. Я. Кулик, М. Г. Мурашко. Минск, Изд. ЦИИИ КГВР, 1974. 83 с.
54. Мичурин Б. П. Энергетика почвенной влаги. Л., Гидрометеониздат, 1975. 139 с.
55. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почв. Л., Гидрометеониздат, 1967. 583 с.
56. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Энергомассообмен в системе растение — почва — воздух. Л., Гидрометеониздат, 1975, 358 с.
57. Опыт прикладных расчетов на ЭВМ движения подземных вод в зоне аэрации / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — В кн.: Тезисы докладов VII совещания по подземным водам. Секция математических методов и моделирования. Новосибирск, 1973, с. 44—45.
58. Опыт расчета эпюр влажности по уравнениям движения воды в почве / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Метеорология и гидрология, 1973, № 2, с. 76—84.
59. Огильви Н. А. Физические и геологические поля в гидрогеологии. М., Наука, 1974. 161 с.
60. Оценка точности определения водопроницаемости горных пород / Н. И. Ильин, С. Н. Чернышев, Е. С. Дзекцер, В. С. Зильберт. М., Наука, 1971. 149 с.
61. Пашковский И. С. Методы определения фильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации. М., Изд-во МГУ, 1973. 119 с.
62. Петрова М. В. Исследование изменчивости поля агрофизических характеристик почвенной влаги. Автореф. дисс. Л., 1973. 22 с.
63. Пичугина Н. В. О расчете влажности в двуслойной почве. — Труды Агрофизического научно-исследовательского ин-та, 1969, вып. 23, с. 18—31.
64. Пичугина Н. В. Об одном алгоритме расчета динамики почвенной влаги в зоне аэрации. — В кн.: Молодые специалисты — мелиоративному строительству. Л., 1973, с. 66—71.
65. Полубарина-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., ГИТТЛ, 1952. 676 с.
66. Почвы Казахской ССР. Вып. 7. Почвы Джамбульской области. Алма-Ата, Наука, 1967. 367 с.
67. Прогноз режима почвенной влаги при орошении и осушении сельскохозяйственных земель / Л. И. Варазашвили, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик и др. Депонировано в ВИНТИ: № гос. регистрации 700 60 607; дата регистрации 22/12 1970; инвентаризационный номер Б 108 785; 250 с.
68. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. М., Наука, 1969. 545 с.
69. Разработка методов моделирования и программ решения на ЭВМ задач движения влаги в ненасыщенной зоне / М. И. Басмановская, Г. М. Верещагина, А. П. Вершинин и др. Депонировано в ВИНТИ. Том I: № гос. регистрации 730 37 530, дата регистрации 29/05 1973, инвентарный номер Б 625 4879, 70 с. Том II: № гос. регистрации 74026 075; дата регистрации 26/04 1974, инвентарный номер Б 317 168, 130 с.
70. Разумова Л. А. Пространственная изменчивость и способы учета влажности почвы на орошаемых полях. — Труды Центрального ин-та прогнозов, 1965, вып. 145, с. 3—29.
71. Расчет гидрологического режима почвы на ЭВМ как метод переноса

- результатов лизиметрических наблюдений в полевых условиях / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Метеорология и гидрология, 1973, № 11, с. 77—80.
72. Ревут И. Б. Физика почв. Л., «Колос», 1934. 317 с.
 73. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения красных задач. М., Мир, 1972. 418 с.
 74. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Том I. Л., Гидрометеониздат, 1965, 663 с.; том II, Л., Гидрометеониздат, 1969, 286 с.
 75. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений. М., Наука, 1968, 529 с.
 76. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М., Наука, 1971. 552 с.
 77. Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем. М., Наука, 1973. 415 с.
 78. Самарский А. А., Фрязинов И. В. О сходимости однородных разностных схем для уравнения теплопроводности с разрывными коэффициентами. — Журнал вычислительной математики и математической физики, 1961, том I, № 5, с. 806—824.
 79. Саульев В. К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток. М., Наука, 1960. 324 с.
 80. Сковрцов Н. Г. Исследование закономерностей движения влаги в насыщенной и ненасыщенной зонах почвогрунта межканального пространства. Автореф. дисс. Минск, 1976, 23 с.
 81. Сопоставление с лизиметрическими наблюдениями результатов расчета на ЭВМ влагообмена зоны аэрации и грунтовых вод / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Доклады ВАСХНИЛ, 1973, № 9, с. 40—41.
 82. Справочник гидрогеолога. М., Гостеолиздат, 1962, 300 с.
 83. Сабботин А. С. К методике учета осадков и полновных вод при производстве лизиметрических наблюдений. — Труды государственного гидрологического ин-та, 1971, вып. 170, с. 80—90.
 84. Сравнение результатов экспериментального изучения водного режима с расчетами на ЭВМ / В. П. Емец, Л. Л. Журавлева, В. Я. Кулик, Н. В. Пичугина. — Почвоведение, 1976, № 5, с. 101—104.
 85. Судницын И. И. Закономерности передвижения почвенной влаги. М., Наука, 1964, 134 с.
 86. Судницын И. И. Новые методы оценки воднофизических свойств почвы и влагообеспеченности леса. М., Наука, 1966, 150 с.
 87. Термодинамика почвенной влаги. Сб. переводов под ред. А. М. Глобуса. Л., Гидрометеониздат, 1966. 437 с.
 88. Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа. М., Мир, 1968. 427 с.
 89. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. Л., Гидрометеониздат, 1975. 373 м.
 90. Чайлдс Э. Физические основы гидрологии почв. Л., Гидрометеониздат, 1973. 427 с.
 91. Чернышевская Л. Е., Бодрик А. Г. Выбор коэффициента диффузии при решении задач о передвижении влаги в насыщененной почве. — Мелиорация и водное хозяйство, 1972, вып. 23, с. 77—83.
 92. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. М., Наука, 1976, 399 с.
 93. Чубаров В. Н. Питание грунтовых вод песчаной пустыни через зону аэрации. М., Недра, 1972. 136.
 94. Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиорации. Л., Гидрометеониздат, 1973. 165 с.
 95. Шаманский В. Е. Численное решение задач фильтрации грунтовых вод на ЭЦВМ. Киев, Наукова думка, 1969. 375 с.
 96. Швидлер М. И. Фильтрационные течения в неоднородных средах. М., Гостоптехиздат, 1963, 135 с.
 97. Шредер Л. Н. Применение ЭЦВМ при расчете влагопереноса в зоне аэра-

- ции. — Инженерные изыскания в строительстве, 1973, вып. 2(20), с. 40—43.
98. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М., Гостоптехиздат, 1960. 249 с.
 99. Юзефович Г. И., Янгарбер В. А. Исследование нелинейного уравнения влагопереноса. — Труды Агрофизического научно-исследовательского ин-та, 1967, вып. 14, с. 5—11.
 100. Якобс А. И. Расчет годового хода влажности почв и грунтов. — Вестник сельскохозяйственной науки, 1961, № 8, с. 108—116.
 101. Якобс А. И. Расчет хода удельного сопротивления почвогрунта и сопротивления заземления. — Электричество, 1962, № 6, с. 47—51.
 102. Янгарбер В. А. Математическое исследование некоторых задач движения почвенной влаги. Автореф. дисс. Л., 1967, 11 с.
 103. Янгарбер В. А. Об устойчивости (по Ляпунову) решения при конечно-разностной аппроксимации уравнения влагопереноса. — Труды Агрофизического научно-исследовательского ин-та, 1971, вып. 30, с. 27—33.
 104. Яценко Н. Н. Метод дробных шагов многомерных задач математической физики. Новосибирск, Изд-во АН СССР, 1966. 225 с.
 105. S. Al-Khafar, Hanks R. J. Evaluation of the fiber paper method for estimating soil water potential. — Soil Sci., v. 117, N 4, 1974, p. 194—199.
 106. Ashcroft G. et al. Numerical method for solving the diffusion equation. — Soil Sci., Soc. Am. Proc., v. 26, N 6, 1962, p. 522—526.
 107. Douglas J. and Jones B. T. On predictor—corrector methods for nonlinear parabolic differential equations. — J. Soc. Ind. Appl. Math., v. 11, 1963, p. 195—204.
 108. R. Allan Freeze. The mechanism of natural ground water recharge and discharge. — Water Resour. Res., v. 5, N 1, 1969, pp. 153—171.
 109. Gardner R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide range. — Soil Sci., v. 43, 1937, p. 277—283.
 110. Hanks R. J., Klute A., Bresler E. A numerical method for estimating infiltration, redistribution, drainage and evaporation. — Water Resour. Res., v. 5, N 5, 1969, p. 1064—1069.
 111. Hanks R. J., Bower S. A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soil. — Soil Sci., v. 26, N 6, p. 10—20.
 112. Hanks R. V., Gardner H. R. Influence of difference diffusivity-water content relation on evaporation of water from soils. — Soil Sci. Soc. Am. Proc., v. 29, N 5, 1965, p. 495—498.
 113. Hornberger G. M., Irwin Remson. A moving boundary model of one-dimensional saturated-unsaturated flow system. Water Resour. Res., v. 6, N 3, 1970, p. 898—905.
 114. Nielsen D. R. et al. Soil water. Madison, 1972, 175 p.
 115. McQueen J. S., Miller R. F. Calibration and evaluation of wide range gravimetric method for measuring moisture stress. — Soil Sci., v. 106, 1968, p. 225—231.
 116. Rubin J. et al. Soil water relation during the rain infiltration. — Soil Sci., v. 27, 1963, p. 240—251; v. 28, 1964, pp. 1—5, 614—619.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
Глава 1. ПРОСТЕЙШИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В ПОЧВЕ	6
1. Уравнение водного баланса	6
2. Баланс сил	6
3. Уравнения гидрофизических характеристик	7
4. Расчетное дифференциальное уравнение	8
5. Краевые условия	8
6. Автокомпенсационность	11
7. Упрощенный метод определения гидрофизических характеристик почв	17
Глава 2. ОТ УРАВНЕНИЯ К РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ	25
1. Аналитические решения	25
2. Метод конечных разностей	27
3. Простейшая явная схема	30
4. Устойчивость	32
5. Неявная разностная схема	41
6. Проблема точности	47
7. Слонность почвы	50
8. Одновременный расчет влагозапасов, потоков влаги и других величин	51
9. Пути увеличения точности расчетных схем	57
Глава 3. ОТ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДО ЧИСЛА	68
1. От расчетной схемы к рабочей программе	68
2. ЭЦВМ	69
3. Исходные данные для расчета	71
4. Как получить исходные данные	73
5. Массивы исходных данных	74
6. Оформление результатов расчета	78
7. Процедура расчета	80
Глава 4. СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТОВ С ПОЛЕВЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ	82
1. Краткое описание одного из районов и методики наблюдений	83
2. Измеренные и вычисленные эпюры влажности	85
3. Простейший статистический анализ	93
4. Наблюдаемые и рассчитанные потоки влаги	97
5. Сравнение результатов расчета с более точными наблюдениями	101
Глава 5. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	108
1. Рационализация наблюдений за водным режимом почвы	108
2. Анализ и контроль результатов измерений	111
3. Построение хронопозолет, вычисление средних, интерполяция и экстраполяция	119
4. Экстраполяция наблюдений на «соседние» и «аналогичные» участки	125
5. Съемки влажности и оценка пространственной изменчивости влагозапасов	127
6. Моделирование и прогноз водного режима почвы	128
7. Некоторые организации, производящие расчеты на ЭЦВМ водного режима зоны аэрации	131
Глава 6. ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ	132
1. Влияние точности исходных данных на погрешность расчета	132
2. Численные опыты для оценки погрешностей	138
3. Несовершенство модели	148
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ	153
Список литературы	156