

832  
С.А. ВЕРИГО  
Л.А. РАЗУМОВА

# ПОЧВЕННАЯ ВЛАГА



145824 6/c

С. А. ВЕРИГО  
Л. А. РАЗУМОВА

# ПОЧВЕННАЯ ВЛАГА

(применительно  
к запросам  
сельского хозяйства)

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ  
ЛЕНИНГРАД • 1973

В монографии обобщаются результаты исследований связи водного режима почв с метеорологическими условиями, а также влияния влажности почвы на производство полевых работ и урожай сельскохозяйственных культур.

Приводятся основные закономерности формирования запасов почвенной влаги. Дается обоснование способов регулирования водного режима почв и оценка эффективности воздействия агротехнических мероприятий на влагообеспеченность сельскохозяйственных культур при различных метеорологических условиях.

Излагаются методы определения влажности почвы, оценки запасов почвенной влаги, влагообеспеченности основных сельскохозяйственных культур и условий формирования урожая.

Книга рассчитана на специалистов сельского хозяйства, агрометеорологов, мелиораторов, студентов и аспирантов агрометеорологов.

The monograph presents the studies on water regime of soil as related to meteorological conditions and the effects of soil moisture and agricultural operations upon crop yield.

The soil moisture storage is discussed. Control of the soil water regime and assesment of the efficiency of agricultural works, carried out to provide crops with water in various meteorological conditions, is considered.

The book presents the technique of soil moisture measurement, methods of estimating water provision for major types of crops and problems of yield formation.

This volume may be of interest to experts in agriculture, agrometeorologists and to students in the field of agrometeorology.

## ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Данная книга является вторым, переработанным и дополненным изданием монографии «Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве» (Л., Гидрометеиздат, 1963), тираж которой разошелся вскоре после выхода в свет.

Со времени выпуска первого издания несколько изменились представления о физических свойствах почвенной влаги, подходы к анализу и описанию процессов ее перемещения в системе почва—растение—атмосфера и углубились методы анализа этих процессов. Претерпели изменения также терминология и система единиц измерения в связи с предпринятыми у нас и за рубежом усилиями по их унификации и уточнению. Кроме того, выполнен ряд ценных полевых и лабораторных экспериментов и наблюдений с целью изучения агрогидрологического режима территории СССР и агрогидрологической эффективности агротехнических и мелиоративных мероприятий. В связи с внедрением новой агротехники накоплены большие материалы, особенно по изучению воздействия орошения на водный режим почв, на темпы развития растений и формирование урожаев сельскохозяйственных культур.

Авторы этой книги, канд. с.-х. наук С. А. Вериго и д-р геогр. наук, заслуженный деятель науки РСФСР Л. А. Разумова, подготавливая второе издание, внесли в книгу существенные добавления и изменения, связанные в первую очередь с современным представлением о физике описываемых явлений. Изменения коснулись также и названия книги.



## ВВЕДЕНИЕ

Почвенная влага — это ресурсы для построения тела растений и это один из основных факторов, определяющих условия существования сельскохозяйственных культур и обработки почвы.

Процесс фотосинтеза на большей части территории СССР ограничен не количеством солнечной энергии, а количеством воды. В связи с этим рациональное использование воды, по крайней мере в аридных зонах, является основной проблемой.

Влага в корнеобитаемом слое почвы — практически единственный источник водоснабжения растений. Постоянно происходящий обмен влагой между почвой, растением и атмосферой непрерывно меняет содержание почвенной влаги. Поэтому изучение этого жизненно необходимого фактора сводится к изучению режима влаги в почве, определяемого совокупностью процессов поступления ее в почву, изменения физического состояния, передвижения и расходования ее из почвы.

В большинстве районов нашей страны колебания урожаев от года к году чаще всего вызываются несоответствием запасов влаги в почве потребностям в ней растений. Специализация сельского хозяйства, структура посевных площадей, подбор сортов, система обработки почвы и удобрений, способы уборки сельскохозяйственных культур, не говоря уже о коренных мероприятиях: орошении, осушении, полезащитном лесоразведении — вот далеко не полный перечень тех вопросов, решение которых требует учета особенностей водного режима сельскохозяйственных угодий и закономерностей его изменений в зависимости от погоды.

Изучение водного режима почвы в нашей стране началось в конце прошлого столетия и в настоящее время идет по трем направлениям.

1. Генетико-гидрологическое, изучающее роль водного режима почвы в процессе почвообразования. Это направление начало развиваться с возникновением почвоведения как самостоятельной научной дисциплины.

2. Опытнo-агрономическое — связано с разработкой агротехнических приемов повышения влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Оно возникло на сельскохозяйственных опытных станциях.

3. Агрогидрологическое, направленное на изучение в географическом разрезе, применительно к климатическим условиям терри-

тории и к метеорологическим условиям отдельных лет, роли почвенной влаги в повышении урожайности сельскохозяйственных культур и организации мероприятий по повышению эффективности сельскохозяйственного производства. Это направление сформировалось в процессе удовлетворения практических требований сельского хозяйства к сельскохозяйственной метеорологии. Полная реконструкция сельского хозяйства после установления Советской власти потребовала наиболее разумного и эффективного использования всех природных ресурсов.

Данные о гидрометеорологических факторах сельскохозяйственного производства стали жизненно необходимым звеном в организации социалистического хозяйства, регулируемого единым государственным планом.

Постановлением Совета труда и обороны, подписанным В. И. Лениным 29 IV 1921 г., агрометеорологическое обеспечение народного хозяйства было возложено на Опытный отдел Народного Комиссариата Земледелия (НКЗ). Позднее агрометеорологическое обслуживание сельского хозяйства было возложено на Гидрометслужбу СССР, в частности были вменены в обязанность: 1) информация об обеспечении влагой сельскохозяйственных культур и об условиях обработки почвы на территории СССР; 2) прогнозы влагообеспеченности сельскохозяйственных культур; 3) оценка (характеристика) территории СССР по влагообеспеченности; 4) обоснование агротехнических и мелиоративных мероприятий с учетом климата и погоды. В процессе решения этих задач в первую очередь было сосредоточено внимание на почвенной влаге — практически единственном источнике воды, непосредственно доступной для растений. Так сформировалось агрогидрологическое направление в изучении водного режима почв, которое и легло в основу агрогидрологии как отдельной дисциплины сельскохозяйственной метеорологии — ее содержания, методологии и методики исследований.

Ко времени возникновения агрогидрологии как в нашей стране, так и за рубежом уже имелись большие достижения в области почвоведения, физиологии растений, сельскохозяйственной метеорологии, гидрологии, земледелия и др., в познании физики почв, их водного режима, а также водопотребления культурных растений. Целенаправленный отбор самого необходимого из этих достижений как в области познания общих закономерностей и явлений, так и в методике исследований позволил научно подойти к разработке методов и организации агрогидрологических исследований и сетевых наблюдений.

Ценность систематических сетевых наблюдений обуславливается наличием громадной сети агро- и гидрометеостанций в Гидрометслужбе Советского Союза и сопряженностью наблюдений. Только данные таких массовых наблюдений над влажностью почвы могут удовлетворить потребности оперативного обслуживания сельского хозяйства информацией и прогнозами влагообеспеченности сельскохозяйственных культур и условий обработки почвы.

Данная монография выполнена на основе обобщения материалов и исследований сети агро- и гидрометеостанций, научных подразделений Гидрометслужбы и других ведомств СССР, зарубежных исследований, а также исследований авторов этой монографии.

Первые три главы посвящены рассмотрению особенностей почвенной влаги как главного источника водоснабжения сельскохозяйственных растений. Они построены в основном на литературных источниках, отечественных и зарубежных, включая издания самых последних лет.

В следующих главах изложены закономерности формирования запасов продуктивной влаги и связи режима влажности почвы с метеорологическими условиями.

В восьмой и девятой главах обобщены результаты исследований влияния запасов продуктивной влаги на формирование урожаев сельскохозяйственных культур и на условия обработки почвы; в десятой и одиннадцатой главах излагаются результаты исследований эффективности агротехнических мероприятий в улучшении водного режима почв и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в богарных условиях и при орошении.

В последней, двенадцатой, главе дается характеристика распределения запасов продуктивной влаги и влагообеспеченности озимых и яровых зерновых культур на территории СССР и описание агрогидрологических зон Советского Союза.

## Глава I

### СВОЙСТВА ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Почвенная влага отличается от воды в массе рядом особенностей. Она размещена в пористой, высоко дисперсной и анизотропной почвенной среде. В состав почвы входят как мельчайшие частицы коллоидальной, даже молекулярной дисперсности (диаметром  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  мм), так и частицы грубой дисперсности, диаметром более 1 мм, а иногда даже более 10 мм. Почвенная влага находится под воздействием сил, зависящих от размеров и формы почвенных пор, а также от природы почвенных частиц.

Дисперсность обуславливает сильную раздробленность воды и огромную поверхность взаимодействия ее с почвой (поверхность раздела), сильно отражающуюся на поведении почвенной влаги. Несмотря на большое значение поверхности раздела, вследствие полидисперсности и наличия частиц молекулярного размера до настоящего времени нет надежных методов ее количественного учета. Для определения величины поверхности раздела используются три косвенных метода: по теплоте смачивания, по максимальной гигроскопичности и по способности почв поглощать красящие вещества. Эти методы дают лишь приближенные величины, часто весьма различные. О том, как сильно возрастает удельная поверхность раздела с уменьшением размеров почвенных частиц, можно судить по данным табл. 1. Из этих данных следует, что даже ничтожное количество коллоидальной фракции в почве сильно увеличивает поверхность раздела.

Таблица 1

**Удельная поверхность почвенных частиц  
различного диаметра**

Класс по Аттербергу	Диаметр частиц (мм)	Удельная поверхность (см <sup>2</sup> /г)
Крупный песок . . . . .	2,0—0,2	45
Мелкий песок . . . . .	0,2—0,02	446
Ил . . . . .	0,02—0,002	4 458
Ультраглина . . . . .	10 <sup>-4</sup> —10 <sup>-6</sup>	9 890 000

Почва состоит, как правило, из частиц не только различных размеров, но и различной формы. Крупные частицы, диаметром

больше 0,05 мм (песок), состоят из полных твердых зерен, частицы с меньшим диаметром (ил, пыль, глина) — преимущественно из гибких чешуек.

Количественное содержание частиц разного размера в почве определяется путем механического анализа. Классификация полученных в результате анализа механических элементов по их крупности производится по специальной шкале. Существует много классификаций почв по механическому составу. При агрогидрологических исследованиях более целесообразно пользоваться классификацией Н. А. Качинского [88, 89]. В основу этой классификации положено содержание (в процентах) физической глины — частиц диаметром меньше 0,01 мм — и физического песка — частиц диаметром больше 0,01 мм. По их соотношению дана основная шкала почв (табл. 2).

Таблица 2

**Классификация почв по механическому составу (по Н. А. Качинскому [88, 89]) на основе соотношения (в процентах) фракций физической глины (числитель) и физического песка (знаменатель)**

Название почв по механическому составу	Тип почв		
	подзолистый	степной, красноземы и желтоземы	солонцы и сильно-солонцеватые
<b>Песок</b>			
	0—5	0—5	0—5
рыхлый . . . . .	100—95	100—95	100—95
	5—10	5—10	5—10
связный . . . . .	95—90	95—90	95—90
	10—20	10—20	10—15
Супесь . . . . .	90—80	90—80	90—85
<b>Суглинок</b>			
	20—30	20—30	15—20
легкий . . . . .	80—70	80—70	85—80
	30—40	30—45	20—30
средний . . . . .	70—60	70—55	80—70
	40—50	45—60	30—40
тяжелый . . . . .	60—50	55—40	70—60
<b>Глина</b>			
	50—65	60—75	40—50
легкая . . . . .	50—35	40—25	60—50
	65—80	75—85	50—65
средняя . . . . .	35—20	25—15	50—35
	> 80	> 85	> 65
тяжелая . . . . .	< 20	< 15	< 35

В природных условиях элементарные частицы почвы обычно коагулируются и образуют агрегаты — структурные отдельности. Структурообразование идет или путем коагуляции коллоидов, или путем свертывания коллоидов электролитами — кальцием, магнием и др. Вследствие этого в естественных почвах наличие не связанных друг с другом элементарных частиц крайне ограничено. В оструктуренных почвах степной зоны они практически отсутствуют. Элементарные механические частицы собраны в агрегаты той или иной величины и формы (зернистые, ореховатые, пластинчатые и др.), которые в свою очередь, соединяясь друг с другом, образуют более крупные, сложные агрегаты.

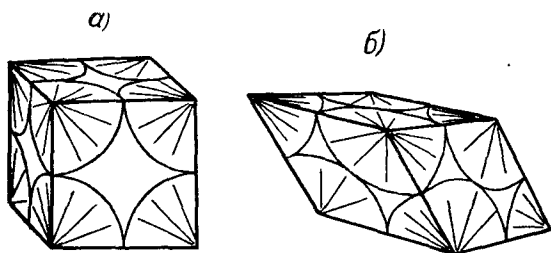


Рис. 1. Шарообразные частицы в октаэдрической (а) и гексагональной (б) упаковке.

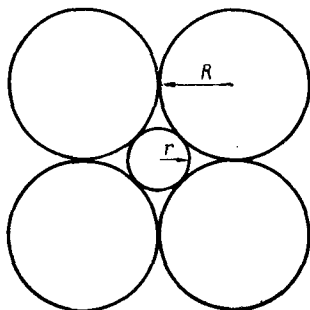


Рис. 2. Соприкосновение четырех шарообразных частиц при кубической упаковке.

При соприкосновении почвенных частиц и агрегатов образуется система пор, в которых размещается почвенная влага.

Объем, размеры и форма пор обуславливают поведение почвенной влаги. Однако изучение их в такой сложной полидисперсной системе, как почва, является очень трудным. Поэтому была использована модель «идеальной» почвы, т. е. почвы, состоящей из шарообразных частиц одинакового диаметра [91].

Различают два основных вида взаимного расположения частиц в идеальной почве (два вида упаковки): наиболее рыхлое расположение — октаэдрическое (кубическое, рис. 1 а) и наиболее плотное — гексагональное (рис. 1 б). При октаэдрической упаковке скважность, или порозность (т. е. общий объем пор), составляет 47,64% всего объема почвы, при наиболее плотной, гексагональной, 25,95%.

При октаэдрической упаковке каждая элементарная пора имеет форму октаэдра с вогнутыми сферическими гранями. Радиус наиболее узкой части поры (узкие проходы пор) равен радиусу круга  $r$ , вписанного между четырьмя соединенными шарами (рис. 2), причем  $r=0,41R$ , где  $R$  — радиус шарообразной почвенной частицы. Радиус же самой широкой части поры, равный радиусу круга, вписанного между восьмью соприкасающимися шарами (частицами), составляет  $0,73R$ .



При гексагональной упаковке имеются поры двух форм: тетраэдрические и ромбоэдрические (рис. 3). Количество тетраэдрических в два раза больше, чем ромбоэдрических. При этой упаковке радиус наиболее узких проходов, равный радиусу вписанного между тремя соседними частицами круга, составляет  $0,155R$  (рис. 4, [189, 192]). Радиус наиболее широкой части тетраэдрических пор равен  $0,288R$ , а ромбоэдрических —  $0,414R$ .

Таким образом, даже если исходить из модели идеальной почвы, почвенная порозность представляет собой совокупность пустот различных форм и размеров, соединяющихся между собой в разных направлениях ходами, более узкими, нежели поперечники самих пустот. В природных условиях строение почвенных пор несоизмеримо сложнее, особенно в суглинистых и глинистых почвах,

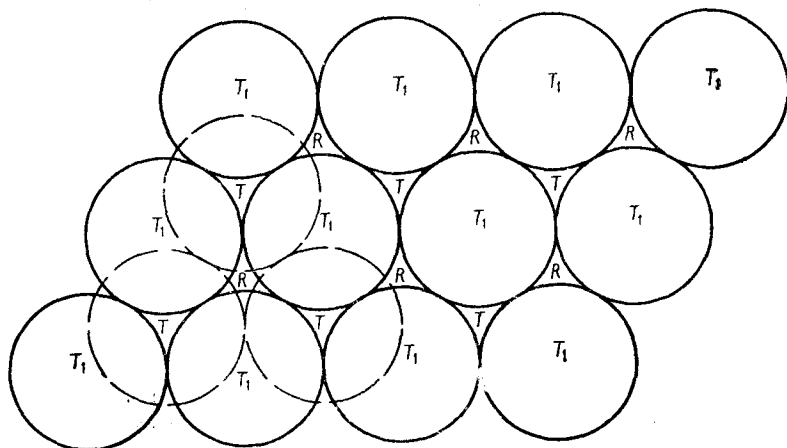


Рис. 3. Расположение ромбоэдрических  $R$  и тетраэдрических  $T$  пор при гексагональной упаковке.

состоящих в основном из пластинчатых и чешуйчатых частиц и агрегатов различных размеров и формы. Только в почвах грубого механического состава — песчаных и гравийных — при условии окатанности составляющих их частиц поры по своей форме могут приближаться к порам идеальной почвы.

Поскольку в полевых условиях порозность (скважность) складывается из пор, имеющих между отдельными элементарными частицами почвы, и из пор внутри агрегатов (внутриагрегатная порозность) и между ними (межагрегатная порозность), то общая скважность в поле значительно больше, чем теоретическая, особенно в структурных черноземных почвах. В малоструктурных подзолистых почвах общая скважность значительно меньше, чем в черноземных, причем в легких почвенных разностях (оподзоленный легкий суглинок) даже в верхнем гумусовом слое она не достигает теоретического предела.

Поведение влаги в почве определяется не только размерами и формой почвенных пор, но и свойствами самой воды. Молекулы

воды не являются энергетически нейтральными. Они представляют собой диполи с отрицательным зарядом (ионы  $O^-$ ) на одном конце и положительным (ионы  $H^+$ ) на другом (рис. 5). Диполи воды могут притягиваться ионами вследствие взаимного притяжения электрических зарядов ионов к полюсам гидролей. Это явление называется гидратацией ионов и выражается в конечном счете в образовании гидратной оболочки вокруг ионов, состоящей из притянутых ионами молекул воды. Учитывая различные размеры ионов, можно заранее предвидеть, что величина гидратных оболочек у разных ионов различна.

Гидратация ионов имеет большое значение в процессах передвижения влаги и поглощения ее растением, поскольку почвенная влага всегда является раствором, а не чистой водой [192, 267].

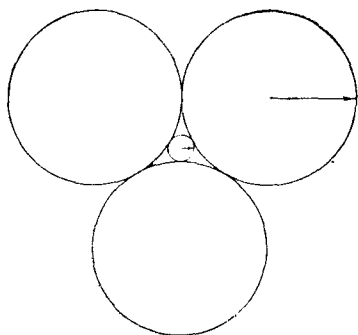


Рис. 4. Соприкосновение трех частиц при гексагональной упаковке.

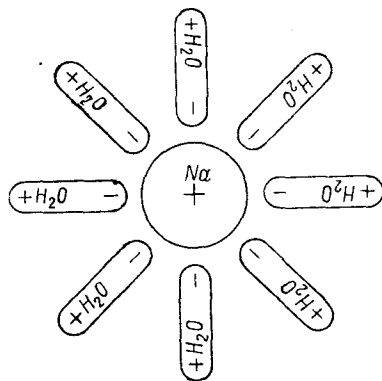


Рис. 5. Гидратированный ион натрия, окруженный дипольными молекулами воды.

То, что почвенная влага находится в раздробленном состоянии, что она как бы вкраплена в поры разных размеров и форм, в том числе и в мельчайшие из них, соизмеримые с величиной молекул, что она имеет огромную поверхность раздела и не является чистой водой, а содержит в себе целый ряд как положительных, так и отрицательных ионов, обуславливает неоднородность физических и химических свойств содержащейся в почве влаги и резкое отличие этих свойств от свойств воды в массе.

Соответственно механизму удержания выделяют три различные по физическим и химическим свойствам категории почвенной воды: связанную, капиллярную и гравитационную.

**Связанная вода.** Связанная вода удерживается адсорбционными силами (химическими и ван-дер-ваальсовскими) на поверхности почвенных частиц. Адсорбционные силы зависят в основном от электрических свойств поверхности почвенных частиц и почвенного раствора. Благодаря огромной поверхности частиц почва адсорбирует значительное количество воды. Этот процесс происходит экзотермически, со значительным выделением тепла, что

является основным доказательством адсорбированного (связанного) состояния воды. Тепло, выделяющееся при соприкосновении сухой почвы (высушенной при  $105^{\circ}\text{C}$ ) с водой, называется теплотой смачивания почвы [11, 304, 313 и др.].

Так как каждая молекула адсорбированной воды связана с поверхностью почвенной частицы мощным силовым полем, от 50 до десятков тысяч атмосфер, то по своим свойствам адсорбированная вода близка к твердому телу. Она носит название прочносвязанной воды и может передвигаться только переходя в пар. Плотность ее выше единицы. Наибольшая плотность соответствует первым порциям сорбированной воды. Каждая последующая порция сорбированной воды имеет все меньшую и меньшую плотность. Средняя плотность сорбированной воды для различных почв колеблется в пределах 1,1—1,5 [192].

Прочносвязанная вода замерзает при температуре  $-4^{\circ}\text{C}$  и ниже. Согласно исследованиям [271], при охлаждении до  $-78^{\circ}\text{C}$  в почве еще остается некоторое количество незамерзшей воды. Прочносвязанная вода имеет удельную теплоемкость, равную единице [192], и лишена электропроводности. Она неподвижна и не растворяет электролитов и других веществ, растворяющихся в свободной воде. При связывании этой воды выделяется энергия в виде теплоты смачивания [11, 67, 87, 192, 223, 224 и др.].

По мере удаления от адсорбирующей поверхности почвенных частиц свойства связанной воды меняются, энергия связи падает пропорционально величине  $1/r^3$  ( $r$  — удаление от поверхности частицы). Более внешние слои удерживаются меньшей силой, чем внутренние, и поэтому имеют более рыхлое строение. Этот вид почвенной влаги носит название рыхлосвязанной. Рыхлосвязанная вода покрывает частицы почвы слоем, лежащим над слоем прочносвязанной воды. Она образуется вследствие вторичной ориентации дипольных молекул воды сверх адсорбированной воды, а также за счет гидратации в различной степени диссоциированных ионов и удерживается силами, значительно меньшими, чем прочносвязанная. По своим свойствам рыхлосвязанная вода меньше отличается от обыкновенной воды. В почвенных порах она незаметно переходит в свободную воду, которая удерживается в почве разностью поверхностных давлений, создаваемой поверхностями раздела вода—воздух различной кривизны.

Образование рыхлосвязанной воды начинается за счет парообразной влаги, а затем усиливается при сорбции жидкой влаги. По-видимому, рыхлосвязанная вода является жидкой влагой с повышенной вязкостью и может передвигаться в виде пленки. При некоторых условиях внутренние ее слои приобретают свойства упругого твердого тела. Рыхлосвязанная вода характеризуется силами сцепления с почвой от 10 до 50 атм. Она имеет пониженную температуру замерзания (от  $-1,5$  до  $-4,0^{\circ}\text{C}$ ) и обладает пониженной подвижностью.

Толщина слоя прочно- и рыхлосвязанной воды, подобно размеру поверхности раздела вода—почва, недоступна непосредствен-

ному измерению. Ее можно представить себе только как величину, получаемую от деления объема связанной воды на активную поверхность. Данные о толщине слоя связанной воды весьма различны. Однако можно считать установленным, что с уменьшением размеров частиц уменьшается толщина слоя связанной воды и что на углах и ребрах она больше, чем на плоских гранях [62].

**Капиллярная вода.** Капиллярная вода удерживается в почве за счет разности поверхностных давлений, создаваемых поверхностями раздела вода—воздух различной кривизны. Капиллярные силы определяются главным образом геометрией пор и свойствами почвенного раствора.

На поверхности раздела вода—твердое тело, т. е. в случае соприкосновения воды с частицами почвы, равнодействующая сил сцепления может быть направлена или вовнутрь твердого тела (смачивание), или вовнутрь жидкости (тело не смачивается жидкостью). В первом случае сила сцепления между твердым телом и жидкостью больше сил сцепления, присущих самой жидкости, во втором случае — наоборот. Так как для равновесия жидкости необходимо, чтобы в каждой точке поверхности сила, действующая на ее молекулы, была нормальна к этой поверхности, то сама поверхность жидкости оказывается при смачивании вогнутой, при несмачивании — выпуклой. В соответствии с количеством молекул, лежащих под горизонтальной поверхностью, давление пленки на выпуклой поверхности больше, а на вогнутой меньше, чем на горизонтальной.

На вогнутой поверхности

$$P_i = P_0 - \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

на выпуклой

$$P_i = P_0 + \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2)$$

где  $P_i$  — давление при данной кривизне поверхности,  $P_0$  — поверхностное давление жидкости при плоской поверхности (нормальное давление),  $\alpha$  — величина поверхностного натяжения,  $R_1, R_2$  — главные радиусы кривизны поверхности.

Поскольку в случае вогнутой поверхности давление меньше, чем при плоской поверхности, т. е. меньше нормального, которое для удобства сравнения принято за нуль, то давление при вогнутой поверхности всегда имеет отрицательный знак.

Почва является смачивающимся телом, поэтому капиллярная влага в почве всегда имеет вогнутую поверхность и всегда находится под отрицательным давлением. Величина его определяется поверхностным натяжением воды (при 20° С оно равно 72,5 дин/см) и радиусом кривизны, зависящим от размеров и формы пор, т. е. в конечном счете от дисперсности и структуры почвы. Чем меньше размеры почвенных частиц и, следовательно, чем меньше количество включенной между ними почвенной влаги, тем больше поверхность жидкости в сравнении с ее массой, тем большую роль

играют менисковые силы по сравнению с силой тяжести. При большой раздробленности воды в почве сила тяжести ничтожно мала по сравнению с менисковыми силами.

Для того чтобы создать представление о распределении и поведении капиллярной воды в почве, ввиду сложности их изучения обращаются к той же модели идеальной почвы, что и при рассмотрении вопроса о строении почвенной пористости.

В идеальной почве при наличии очень малого количества воды возникают изолированные ее скопления в точках контакта частиц. Вокруг точки соприкосновения образуется водное тело, представляющее собой двояковогнутую линзу, боковая поверхность которой выпукло-вогнутая. Кривизна вогнутой поверхности всегда

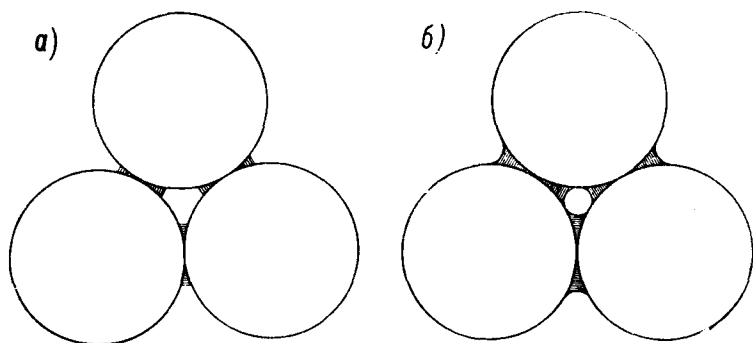


Рис. 6. Возникновение (а) и смыкание (б) манжет стыковой воды между шарообразными частицами.

больше, чем выпуклой, и следовательно, поверхностное давление в таком изолированном скоплении воды, соответственно формуле Лапласа, всегда меньше нормального. Этим и обуславливается удержание ее около стыка почвенных частиц. Такие отдельные скопления воды называют манжетами, а всю совокупность воды, находящейся в почве в виде манжет, — стыковой (рис. 6), или пендулярной водой [67, 91, 192].

Так как связь между отдельными манжетами и передача гидростатического давления отсутствуют, стыковая вода не может передвигаться в капельножидком состоянии. Передвижение ее возможно главным образом при переходе в пар и лишь в очень малой степени — при пленочном движении рыхлосвязанной воды. Таким образом, ее можно считать практически неподвижной водой. Судя по силе удержания стыковой воды почвой, замерзание ее должно происходить при температуре ниже  $-1,5^{\circ}\text{C}$ .

С увеличением содержания воды в почве манжеты растут. Когда радиус манжет становится равным  $0,155 R$  ( $R$  — радиус почвенных частиц), края отдельных манжет в самых узких сечениях пор соприкасаются. В этот момент общий объем воды, составляющий манжеты, невелик и равен 18,3% общего объема пор

при кубической упаковке и 22,6% объема пор при гексагональной упаковке. Одновременно с этим в почве продолжает существовать система сплошь связанных воздушных промежутков (рис. 6 б). Такое состояние влаги в почве принято называть фуникулярным. При нем возможна передача гидростатического давления, а следовательно, и переход воды в жидком состоянии из одной точки в другую. Вместе с тем сохраняется свободное передвижение воздуха в почвенной массе. Из-за крайне узких водяных путей передвижение влаги при фуникулярном ее состоянии, однако, очень затруднено.

При дальнейшем увеличении влажности вода сплошным слоем покрывает частицы почвы, оставляя в порах свободные просветы и образуя пленку, выпуклую наружу на всех почвенных частицах и вогнутую внутрь в точках их соприкосновения (вода открытых капилляров). Постепенное утолщение пленки приводит к тому, что поры сплошь заполняются водой. Пленка совсем закрывает перехваты между почвенными частицами, так что воздух в виде сферических пузырьков (защемленный воздух) может оставаться лишь в наиболее широких сечениях. Такое состояние влаги, когда она образует сплошное тело, а воздух или отсутствует, или находится в изолированных скоплениях, называется капиллярным состоянием [192]. Передвижение воздуха в порах прекращается, отрицательное давление приближается к нулю, и почва переходит в состояние капиллярного насыщения (вода закрытых капилляров). Вода удерживается в почве силой около 0,5 атм и меньше, а замерзает при температуре около 0° С.

Пористость естественных почв неизмеримо сложнее пористости идеальной почвы. Поэтому описанные закономерности распределения и поведения капиллярной влаги лишь в очень ограниченном виде могут быть перенесены в природные условия только для крупнозернистых песчаных почв. Для суглинистых и глинистых почв они оказываются практически непригодными. Кроме того, нельзя забывать, что почвенные частицы всегда покрыты слоем связанной воды и капиллярная влага соприкасается не непосредственно с твердыми частицами почвы, а с адсорбированной или связанной водой.

**Гравитационная вода.** При отсутствии отрицательного давления вся дополнительно поступающая в почву влага, подчиняясь силе тяжести, просачивается вниз. В соответствии с действующей на нее силой она называется гравитационной водой. Гравитационная вода находится в почве в некапиллярных порах и может быть обнаружена либо в процессе просачивания, либо в виде скоплений на водоупорах. Гравитационная вода непосредственно не связана с частицами почвы и по своим свойствам практически не отличается от свободной воды в массе.

Смена механизмов удержания влаги при изменении влажности почвы происходит постепенно, и любая система классификации почвенной влаги, в том числе и приведенная, неизбежно оказывается до некоторой степени условной.



**Твердая вода—лед.** При понижении температуры почвы до  $-0^{\circ}\text{C}$  и ниже начинается переход почвенной влаги из жидкого состояния в лед и происходит резкое изменение свойств почвенной влаги: она приобретает свойства твердого тела. Вначале кристаллизуется влага в крупных порах почвы. В этих условиях переход почвенной воды в лед происходит при температурах, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ . По мере замерзания в почве остается все меньше и меньше свободной воды, концентрация почвенного раствора увеличивается, и остающаяся влага замерзает при все более и более низкой температуре. При повышении температуры, наоборот, даже при отрицательных значениях часть кристаллов льда переходит в воду, вследствие чего в любой мерзлой почве «при любой отрицательной температуре в природных условиях всегда содержится некоторое, хотя и весьма незначительное, количество воды в жидкой фазе, находящееся в равновесном состоянии с величиной внешних воздействий и количественно изменяющееся с изменением последних» [241].

Основные физические свойства льда: силы сцепления порядка десятков тысяч атмосфер (при очень низких температурах), плотность меньше 1, теплоемкость около 0,5. Электросопротивление почвы при переходе из талого в мерзлое состояние возрастает от 1000—7000 ом до десятков и даже сотен тысяч ом.

**Парообразная влага.** В природных условиях неотъемлемой составной частью всякой почвы является парообразная влага. Она легко образуется из всех других категорий почвенной влаги даже при самом малом количестве ее в почве. Водяной пар занимает все свободные от воды и льда почвенные поры. Он почти всегда и везде (исключая пустыню) является насыщенным паром, так как время и поверхность соприкосновения его с почвенной влагой практически не ограничены [116].

## Глава II

### ПЕРЕДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

Движение воды в почве может осуществляться путем диффузии — передачи движения от молекулы к молекуле, при котором радиус действия сил, вызывающих движение, соизмерим с размерами молекул, а величина молекул соизмерима с силами молекулярного сцепления, или путем движения массы молекул воды как единого целого под влиянием менисковых сил и силы тяжести.

В настоящее время существует два подхода к оценке и характеристике процесса передвижения влаги в почве: 1) выявление конкретных механизмов движения влаги в почве и их роли на основе сущности явлений и причинных связей, а также с помощью учета сил различной природы, определяющих движение; 2) установление общих закономерностей, определяющих равновесие и направление движения воды в почве, отвлекаясь от конкретных механизмов ее переноса (термодинамический подход). При этом подходе силы различной природы, в совокупности определяющие поведение воды в почве и растениях, объединены в одну равнодействующую.

#### Механизмы передвижения влаги в почве

В природных условиях в почве имеется некоторое количество влаги. Она содержится в ней в жидком, твердом (лед) и в парообразном виде. Вследствие постоянного обмена между почвой, растением и атмосферой содержание влаги в почве непрерывно изменяется.

В случае когда все поры почвы заполнены водой, почва насыщена, она является двухфазной системой почва—вода. Вода в такой почве движется ламинарно, как ньютоновская жидкость, практически несжимаемая и необладающая сопротивлением формы.

В корнеобитаемом слое сельскохозяйственных полей почва обычно ненасыщена: часть ее пор свободна от воды. Такая почва представляет собой трехфазную систему почва—вода—воздух. Закономерности равновесия и переноса почвенной влаги в этих случаях значительно усложняются.

В ненасыщенных почвах вода может прочно адсорбироваться на поверхности частиц, диффундировать в виде пара, передви-

гаться в пленках, покрывающих поверхность твердых частиц, перетекать, подчиняясь капиллярному давлению или градиенту внешнего напора. Пар и жидкость могут взаимодействовать, порождая комбинированный перенос влаги. Вода может двигаться не только в форме объемного потока, но и путем перемещения отдельных молекул в газовой объемной жидкой или адсорбированной фазах. В этих случаях на воду влияют также и силы осмотического давления.

Градиент каждой из действующих сил может вызывать поток влаги, осуществляемый соответствующим механизмом. Для каждого из этих потоков почва обладает особой проницаемостью.

**Передвижение почвенной влаги в жидком виде.** Жидкая влага характеризуется подвижностью, зависящей в первую очередь от количества ее в почве.

При очень низкой влажности почвы (при наличии в ней лишь прочносвязанной воды) передвижение влаги в жидком виде невозможно, а скорость передвижения рыхлосвязанной воды очень мала. Передвижение влаги в жидком виде в этом случае осуществляется в основном путем гидратации; движущим фактором является изменение концентрации почвенного раствора. Силы, вызывающие движение, могут быть очень велики (порядка сил молекулярного сцепления), но радиус их действия очень мал, соизмерим с размерами молекулы воды. В результате этого при очень низкой влажности передвижение влаги происходит на крайне малые расстояния и очень медленно, т. е. микроскопически. Сказанное хорошо согласуется с пленочной гипотезой состояния почвенной влаги [119]. Направление движения при этом механизме в равной степени может быть как вертикальным, так и горизонтальным, при этом размер почвенных пор не имеет значения: движение передается в пределах силового поля отдельных ионов и молекул.

В ненасыщенных почвах, когда, кроме связанной воды, в них имеется капиллярная влага, а более крупные поры заполнены воздухом, влага передвигается в основном под влиянием менисковых (капиллярных) сил. В этом случае силы, вызывающие передвижение влаги, действуют на целые массы молекул, которые движутся как единое целое. Скорость передвижения влаги в ненасыщенных почвах значительно больше, чем при наличии в почве лишь связанной воды, поскольку капиллярная проводимость (скорость передвижения влаги) растет с увеличением влажности почвы. Наибольших и практически постоянных значений она достигает при влажности почвы, несколько превышающей влажность, соответствующую влаге открытых капилляров (капиллярное легкоподвижное состояние воды, по [67]).

Поскольку в ненасыщенных почвах движение происходит под влиянием менисковых сил, определяемых кривизной менисков (вода движется от точек меньшей кривизны менисков к точкам большей их кривизны), то передвижение возможно как в вертикальном (вверх и вниз), так и в горизонтальном направлении. Естественно, что передвижение влаги вверх может происходить лишь

в том случае, если менисковые силы направлены вверх и если они превышают силу тяжести поднимаемого столба воды. Если бы не было трения, то сила, которая движет воду вверх, была бы равна весу поднятого столба воды.

При допущении полного смачивания почвы водой высота капиллярного поднятия от уровня грунтовых вод вверх в такой пористой среде, как почва, в первом приближении может быть определена по формуле Жюрена

$$h = \frac{2\alpha}{gDr} = \frac{2 \cdot 74}{981r} = \frac{0,15}{r}, \quad (3)$$

где  $h$  — высота капиллярного поднятия (см),  $\alpha$  — поверхностное натяжение жидкости, для воды оно равно 74 дин/см,  $g$  — ускорение силы тяжести, равное 981 см/с,  $D$  — плотность жидкости (для воды равна единице),  $r$  — радиус капиллярного промежутка (см). По-видимому, нижняя граница диаметра пор, к которым применима формула Жюрена, лежит между 0,01 и 0,005 мм [192].

По наблюдениям в природных условиях, самый высокий подъем капиллярной влаги над уровнем грунтовых вод не превышал 6 м на тяжелых почвах [87] и 2 м на легких. При этом установлено, что наилучшей водоподъемной способностью обладают не глины, характеризующиеся наименьшим диаметром пор, а суглинки. Причина указанных расхождений расчетных и наблюдаемых величин кроется, во-первых, в том, что вода передвигается в почве не по всему почвенному капилляру, а лишь в той его части, которая остается свободной, помимо пространства, занятого связанной водой, количество которой в глинистых почвах очень велико, поэтому действующий диаметр ничтожно мал; во-вторых, капиллярные силы расходуются не столько на преодоление силы тяжести поднимаемого столба воды, сколько на преодоление силы трения. Огромное значение имеет структура почвы: глинистые, но высокоструктурные почвы обладают хорошей водоподъемной способностью и подвижностью воды.

В природных условиях поры почвы весьма разнообразны по размерам и форме, вследствие чего при передвижении влаги вверх фронт капиллярного смачивания (верхняя граница смачивания) получается не сплошным. В узких капиллярах вода поднимается на значительно большую высоту, чем в широких, поэтому верхнюю зону капиллярного смачивания нередко называют капиллярной бахромой или каймой. Над фронтом капиллярного смачивания влага закрытых капилляров отсутствует или залегание ее носит прерывистый характер.

Скорость капиллярного передвижения воды вверх при смачивании в начале процесса очень велика, исчисляется сантиметрами в минуту, в конце процесса она гиперболически падает. На поднятие воды до высоты 2 см в черноземах Орловской области, по данным лабораторных опытов, потребовалось 2 мин, до 10 см — 87 мин, до 45 см — 47 ч. 20 мин. На поднятие воды до 1 м потребовалось уже от 2 до 3 месяцев, а на высоту 2 м — около года [103].

Для лёссовидных суглинков наибольшая высота капиллярного подъема в лабораторных условиях составляла 350 см, процесс подъема продолжался в течение 5 лет [87]. Причина указанного явления — также малый действующий диаметр пор и большое трение движущейся влаги в тех узких капиллярах, в которых может подниматься вода на такую большую высоту.

Капиллярную воду, примыкающую к уровню грунтовых вод или верховодок, поскольку она находится под их воздействием, называют капиллярно-подпертой водой [86]. Воду, находящуюся в почве и не связанную с грунтовыми водами, называют подвешенной водой [119, 189, 192 и др.].

Мощность слоя подвешенной воды зависит от характера капилляров и имеет определенный предел. В каждом почвенном капилляре способен удерживаться в подвешенном состоянии столбик воды, вес которого не превышает максимально возможную разность поверхностных давлений в самом широком и в самом узком участках данного капилляра, которая в свою очередь определяется максимально возможной разностью кривизны менисков капилляров. Если это условие нарушается, количество влаги, поступающей в почву, будет под действием силы тяжести просачиваться вниз.

Ранее считалось, что к восходящему движению заметных размеров в верхних слоях почвы способна лишь та влага, которая имеет непосредственную связь с грунтовой водой [119]. В последние годы доказано, что и подвешенная вода в значительном количестве способна к восходящему движению [3, 22, 87, 131, 186, 189, 192].

Передвижение подвешенной влаги происходит во всей промоченной толще до тех пор, пока влажность почвы не снизится до некоторой предельной величины, соответствующей разрыву капилляров. После этого передвижение ее вверх в ощутимых размерах прекращается. Бесперывный капиллярный подъем как подвешенной воды, так и воды, находящейся под воздействием грунтовых вод, может осуществляться лишь в том случае, если имеются условия для создания и поддержания разности поверхностных давлений. В талых почвах такие условия наблюдаются при испарении влаги, вызывающем иссушение верхних слоев.

В ненасыщенных почвах передвижение влаги вниз происходит в тех случаях, когда капиллярные силы направлены сверху вниз. Поскольку при передвижении направление капиллярных сил и силы тяжести совпадает, суммарная действующая сила получается большей по сравнению с восходящим движением на величину, равную удвоенной силе тяжести. В связи с этим при одних и тех же капиллярных силах скорость передвижения вниз всегда превышает скорость передвижения вверх, а прекращение движения вниз наблюдается при более низкой влажности. Горизонтальное передвижение влаги в ненасыщенных почвах осуществляется под влиянием одних лишь менисковых сил. Так как в горизонтальном направлении они обычно выравнены, этот вид движения влаги в почве либо отсутствует, либо слабо выражен.

При капиллярном поднятии предел залегания фронта смачивания определяется наиболее широким сечением пор, в случае же проникновения влаги сверху — узким сечением в соответствии с разностью добавочного давления при закрытии и открытии пор (капиллярный гистерезис). Поэтому высота залегания фронта капиллярного смачивания в случае промачивания почвы сверху больше, чем в случае капиллярного поднятия снизу. Для песчаных почв, сложенных из полных твердых зерен, эта разница вследствие большого различия в сечении пор весьма существенна; для глинистых почв, сложенных из гибких чешуек, вследствие малого различия в сечении узких щелевидных пор она слабо выражена.

В насыщенных почвах, влажность которых соответствует влажности закрытых капилляров, а менисковые силы равны нулю, движение воды (фильтрация) определяется распределением гидравлического напора вдоль заполненных водой пор. Вся поступающая вода под влиянием силы тяжести движется вниз гравитационным потоком. По закону Дарси, скорость этого потока  $V$  связана с напором  $i$  или градиентом давления  $dP/dx$  линейным соотношением

$$V = -k_{\phi} \frac{dP}{dx}, \quad (4)$$

где  $k_{\phi}$  — коэффициент фильтрации (коэффициент пропорциональности).

Количество переместившейся воды за единицу времени составляет

$$Q = kiF, \quad (5)$$

где  $Q$  — количество воды, переместившейся в единицу времени,  $i$  — градиент напора, равный разности давления воды в двух точках потока, деленной на расстояние между ними,  $F$  — площадь поперечного сечения, перпендикулярного потоку,  $k$  — коэффициент фильтрации, численно равный высоте столба воды, который при градиенте напора, равном единице, проходит в единицу времени через единицу поперечного сечения, направленного перпендикулярно потоку.

Коэффициент фильтрации — функция свойств почвы, в первую очередь размеров ее частиц, объема пор, обуславливающих наличие свободных для прохождения воды скважин. Существенное значение имеют наибольший и наименьший поперечники почвенных пор, а также распределение диаметров пор между этими поперечниками. Коэффициент фильтрации также зависит от величины трения и вязкости воды.

Объем пор, занятых связанной водой и водой открытых капилляров (удерживаемых у частиц почвы), должен быть исключен из объема пор, проводящих гравитационный поток. При вычислении действующего объема пор плотность связанной воды в первом приближении может быть принята равной 1,4 (средняя для прочной рыхлосвязанной воды), а плотность воды открытых капилля-



ров — 1,0. В этом случае при движении частицы воды не будут непосредственно соприкасаться с частицами почвы. Вязкость воды будет расти соответственно размерам пор аэрации, а не общему размеру пор.

Вязкость заметно увеличивается при диаметре пор, равном 0,0001 мм, и продолжает быстро расти при дальнейшем уменьшении их. На вязкость воды большое влияние оказывает температура: вязкость быстро растет с падением температуры, особенно при значениях, близких к нулю. Коэффициент вязкости воды  $\eta$  при температурах  $t$ , наиболее часто встречающихся в период вегетации, равен

$t \dots$	5	10	15	20	25	30
$\eta \dots$	0,01519	0,01301	0,01138	0,01006	0,00895	0,00800

Для небольшого промежутка времени коэффициент фильтрации — величина почти постоянная, для более длительного промежутка времени весьма изменчива. Во-первых, он резко снижается при набухании, которое уменьшает диаметр активных пор; во-вторых, в процессе увлажнения почва обесструктурируется, поры заиливаются, вследствие чего их активный диаметр также сужается; в-третьих, по мере промачивания толщи почвы поверхность трения увеличивается, поэтому гидростатическое давление растрачивается на преодоление трения и напор воды уменьшается.

Все приведенные закономерности с большими или меньшими ограничениями применимы лишь к ламинарному потоку и совершенно неприменимы к турбулентному движению. При умеренных градиентах напора можно считать, что в порах средних и мелких песков и всех более мелкоземных почв турбулентного движения воды не бывает. Турбулентное движение с большими скоростями осуществляется в более крупных скважинах и трещинах почв.

**Передвижение парообразной влаги в почве.** Оно обусловлено тем, что пар, находящийся в равновесии с жидкостью (насыщенный пар), подчиняется иным законам, чем другие газы, а именно: давление насыщенного пара не меняется при сжатии, оно не зависит от объема и определяется только температурой. При сжатии и понижении температуры часть насыщенного пара всегда переходит в жидкое состояние, обогащая почву водой.

Передвижение влаги в виде пара — наиболее общая форма ее движения в почве. Оно может осуществляться при любом увлажнении почвы. При очень низком влагосодержании, когда в почве остается лишь прочносвязанная вода, это единственный способ ее перемещения [117]. Этот способ остается господствующим и для воды открытых капилляров.

Самым общим непрерывно действующим фактором обмена водяного пара в почве является диффузия — передача движения от молекулы к молекуле в соответствии с законом парциального давления. Диффузное передвижение определяется размерами суммарной поверхности раздела вода — воздух. Оно не зависит от движе-

ния воздуха, в котором водяной пар содержится, и направлено от мест с большей упругостью пара к местам с меньшей его упругостью. Суммарная поверхность раздела вода—воздух определяется удельной поверхностью почвы и ее влажностью; она равна поверхности не занятых водой пор и, следовательно, для каждой почвы увеличивается с уменьшением ее влажности.

Скорость диффузии пара пропорциональна разности упругостей и квадрату поперечного сечения эффективного объема пор, она не зависит от размера и формы индивидуальных пор. Разность упругостей (движущая сила) создается при различной температуре и влажности почвы по ее профилю в соответствии со следующими закономерностями:

1) упругость насыщенного пара  $E$  быстро возрастает с повышением температуры; эта зависимость может быть выражена эмпирической формулой Магнуса [157],

2) упругость насыщенного пара в почве определяется степенью ориентированности имеющейся в ней воды и кривизной ее менисков.

Упругость насыщенного пара уменьшается в связи с ограниченной свободой движения молекул связанной воды и уменьшением капиллярного давления (увеличения отрицательной величины давления в капиллярах). Давление пара над вогнутой поверхностью меньше (а его отрицательные величины больше), чем над свободной плоской поверхностью воды. Согласно работе [125], кривизна менисков воды влияет на упругость насыщенного пара только в тех случаях, когда радиус капилляра меньше длины свободного пробега молекул водяного пара, т. е. меньше  $10^{-5}$  см. При большем радиусе капилляра давление насыщенного пара над мениском воды равно давлению пара над плоской поверхностью. В природных условиях упругость насыщенного пара в почве практически равна упругости над свободной водной поверхностью при влагосодержании почвы, соответствующем максимальному количеству связываемой ею воды, на тяжелых почвах — при несколько большем увлажнении, с момента заполнения капилляров радиусом 0,0001 мм. Принимая во внимание огромную действующую поверхность при низком влагосодержании почв, следует считать, что в этих случаях даже небольшие различия в упругости могут иметь существенное значение.

Передвижение парообразной влаги в почве вместе с воздухом как единого целого осуществляется силой градиента давления по законам движения газа в неоднородных пористых средах. Это значит, что скорость движения частиц пара может быть в сотни и в сотни тысяч раз больше скорости их движения при молекулярном процессе (диффузии) и что она зависит от размеров, формы, прерывистости индивидуальных пор в сочетании их друг с другом.

Градиент давления создается в основном под влиянием изменений температуры воздуха и барометрического давления, вызывающих сжатие и расширение почвенного воздуха.

Благодаря малой удельной теплоемкости воздуха и малым размерам почвенных пор почвенный воздух быстро принимает температуру почвы. Нагретый и потому более легкий воздух будет перемещаться вверх, а на его место будет притекать более холодный и потому более плотный воздух, не оказывающий (вследствие малой теплоемкости) значительного влияния на температуру почвы. Таким образом может происходить значительный обмен воздуха и конвективный перенос влаги от одной части почвы к другой вследствие периодических изменений температуры почвы.

Сжатие и расширение почвенного воздуха под влиянием изменений барометрического давления вызывает весьма малые (неглубокие) перемещения этого воздуха, а тем самым и водяного пара.

**Передвижение влаги при замерзании почвы.** В замерзающих и мерзлых почвах, так же как и в талых, вода передвигается в жидком и парообразном виде. В парообразном виде вода передвигается в соответствии с общим законом, из мест с большей упругостью пара в места с меньшей упругостью. Отличие передвижения пара в мерзлых почвах от передвижения его в талых состоит в следующем. Во-первых, в замерзающих и мерзлых почвах пар, передвигаясь из одного места в другое, фиксируется не только в жидком, но и в твердом виде (превращается в лед). Поэтому степень обогащения замерзающей почвы влагой не зависит от вододерживающей способности почвы и может значительно превосходить последнюю.

Во-вторых, в мерзлых почвах (вследствие более низкой температуры) различия в упругости пара, соответствующие разности температур  $1^{\circ}\text{C}$ , значительно меньше, чем в талых почвах.

В-третьих, при отрицательных температурах передвижение парообразной влаги возможно и в условиях одинаковых температур. Оно вызывается разностью упругости насыщенного водяного пара над переохлажденной водой и льдом; эта разность, как известно, может достигать  $0,25 \text{ мб}$  (при  $t = -10^{\circ}\text{C}$ ).

В-четвертых, отличительной особенностью парообразной влаги в мерзлой почве является передвижение ее от одной поверхности ледяного кристалла к другой вследствие неоднородности их кривизны. В соответствии с формулой Томсона упругость пара на ребре кристалла очень велика. Поэтому в мерзлой почве непрерывно происходит перенос пара с одних кристаллов льда на другие.

Особенности передвижения влаги в жидком виде в замерзающих и мерзлых почвах, в отличие от талых, определяются наличием сил кристаллизации [327]. Из сущности процесса кристаллизации следует, что почвенный раствор при замерзании не может оставаться неизменным, так как по мере вовлечения отдельных молекул воды в кристаллизационную решетку льда концентрация почвенного раствора увеличивается. Вследствие этого возникает разность осмотических давлений в зоне образования кристаллов льда и в той части почвенного раствора, которая еще не охвачена этим процессом. Под влиянием разности осмотических давлений молекулы воды подтягиваются к месту кристаллизации из менее

концентрированных частей почвенного раствора и вновь связываются кристаллами льда. Это наблюдается до тех пор, пока не произойдет выравнивание концентраций, которое может быть вновь нарушено при понижении температуры, результатом чего явится дальнейшее передвижение почвенной влаги к зоне промерзания.

Сила кристаллизации зависит от градиента температуры. При слабом охлаждении (при незначительных отрицательных температурах) образование кристаллов льда идет медленно, разность энергетических уровней невелика. При сильном охлаждении образование кристаллов льда идет интенсивно, разность энергетических уровней значительна. Однако по аналогии с тальми почвами масштабы передвижения жидкой влаги в зону образования кристаллов льда, а также масштабы процесса перехода воды в лед будут определяться не только разностью энергетических уровней, но также (даже в большей мере) подвижностью влаги в почве, зависящей от количества ее в почве.

В условиях низкой влажности при наличии в почве лишь связанной воды скорость передвижения которой ничтожно мала, а вызывающие ее передвижение энергетические уровни очень велики (порядка сил молекулярного сцепления), передвижение влаги в жидком виде может быть лишь микроскопическим и только при очень больших градиентах температуры. В природных условиях это обычно наблюдается при сильном выхолаживании верхних слоев почвы. Надо полагать, что влияние замерзания почвы на изменение ее влажности в таких условиях должно быть весьма малым.

В ненасыщенных почвах при кристаллизации почвенной влаги участвуют менисковые силы. В этом случае приводятся в движение массы молекул, которые передвигаются к зоне промерзания как единое целое со скоростью, значительно превышающей скорость передвижения связанной воды. При этом передвижение жидкой влаги возможно в любом направлении (вода движется от точек с меньшей кривизной менисков к точкам с большей кривизной). При замерзании почвы, когда вода кристаллизуется в верхних слоях, для передвижения одного и того же количества воды требуется большая сила кристаллизации, чем при оттаивании ее, когда кристаллы льда остаются лишь в нижних слоях, так как в первом случае необходимо преодолеть силу тяжести. Вследствие этого при одних и тех же температурах при оттаивании почвы передвижение влаги вниз будет происходить значительно интенсивнее, чем передвижение влаги вверх при замерзании.

Естественно предположить, что до тех пор пока силы кристаллизации превышают водоудерживающую силу почвы, имеющаяся в незамерзших слоях почвы влага будет передвигаться в направлении центров кристаллизации (к фронту промерзания) и, замерзая, обусловит здесь значительное увеличение влажности почвы по сравнению с исходной. В то же время в незамерзшей почве, откуда эта влага передвинулась к центру кристаллизации, количество ее будет меньше по сравнению с исходным: почва как бы высохнет.

В условиях насыщенных почв, непосредственно соприкасающихся с уровнем свободной воды, передвижение влаги, как и в талой почве, будет осуществляться согласно закону Дарси. Но разность напоров, а следовательно, и количество передвигающейся воды в замерзающей почве не будут однозначны с таковыми в талой почве, поскольку при замерзании на свободную воду в порах еще не замерзшей почвы будет передаваться компрессионное давление [236].

При замерзании почвы различают замерзание находящейся в ней воды в замкнутых и незамкнутых системах. В незамкнутой, открытой, системе, из которой вода может уйти, давление, являющееся результатом промерзания, не гидростатично. В замкнутом же пространстве при промерзании возникает гидростатическое давление на замкнутую жидкость. Почвы и грунты, в которых водопроницаемость мала, замерзают как замкнутые системы. Поэтому при замерзании они подвержены деформациям.

Чем сильнее увлажнена почва, тем больше деформация. Естественно, что при замерзании насыщенных почв, соприкасающихся с уровнем грунтовых вод, почвенная деформация (пучение) наибольшая [216].

### **Термодинамические условия передвижения почвенной влаги**

Термодинамический подход к оценке состояния и передвижения влаги в почве и математизация этих процессов излагается в основном на обобщающих работах последних лет [6, 21, 46, 48, 192, 193, 210, 213, 214, 218, 239, 261 и др.]. Излагаются в основном уже общепризнанные положения и без сложных математических выкладок.

Почвенная влага, в том числе и прочносвязанная, всегда находится в состоянии теплового хаотического движения. В этом состоянии все молекулы и группы молекул воды движутся с равной вероятностью во всех направлениях, и поэтому содержание влаги в различных точках остается постоянным: почвенная влага находится в состоянии динамического равновесия.

Динамическое равновесие почвенной влаги, обусловленное тепловым хаотическим движением молекул, нарушается, если на это движение наложится движение направленное (действующее в каком-нибудь одном направлении). Направленный поток может возникнуть под воздействием одной или нескольких одновременно действующих внутренних и внешних сил.

Внутренние силы — это силы взаимодействия твердой фазы почвы с водой (силы адсорбции, менисковые силы) и силы осмотические. Внешние силы — это силы земного тяготения, механического давления, а также силы, вызванные наличием температурного, электромагнитного и других полей.

Для определения результирующей величины всех сил, действующих на состояние и движение влаги в данный момент в выб-

ранной точке, необходимо эти разные по природе и характеру действия силы выразить в одной размерности, одной системой единиц, просуммировать их и выразить эту результирующую величину с помощью одного обобщенного энергетического показателя. Для решения этой задачи привлекаются термодинамические функции и термодинамический анализ.

Термодинамический анализ позволяет установить общие закономерности, определяющие равновесие и направление передвижения воды в почве, отвлекаясь от конкретных механизмов переноса воды, определить способность отдельных компонентов выделяться из одной фазы и переходить в другую, получить ряд количественных закономерностей распределения воды в почве и передвижения ее в системе почва—растение—атмосфера.

Термодинамика — наука об энергии и ее превращениях, причем под энергией понимается способность тела или системы выполнять работу. Так как совершенная работа есть мера затраченной энергии, то работа и энергия измеряются одними и теми же единицами. Энергия, запасаемая в системе за счет взаимного расположения частей системы, называется потенциальной, а накапливающаяся в системе при движении ее самой или ее части — кинетической. Сумма потенциальной и кинетической энергии называется внутренней энергией. Отношение поглощенного системой количества тепла  $\Delta q$  к температуре называется энтропией  $\Delta S$ . Следовательно,

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T}, \quad (6)$$

где  $S$  и  $q$  относятся соответственно к энтропии и теплоте на 1 г вещества.

Термин «энтропия» введен для того, чтобы описывать и рассматривать изменения энергии, связанные главным образом с превращением тепловой энергии в другие ее формы. Для описания энергетических изменений в электричестве, магнетизме, механике и в гидродинамике пользуются термином «потенциал».

Для характеристики энергетического состояния такой многофазной и многокомпонентной системы, как почвенная влага и водный режим растений, введена функция, называемая свободной энергией, или термодинамическим потенциалом. Эта функция объединяет в себе те критерии и свойства потенциала и энтропии, которые наиболее важны при изучении термодинамики почвенной влаги и использования ее растениями. Свободную энергию выражают через энтропию

$$f = e + P_v - T_s = h - T_s, \quad (7)$$

где  $f$  — свободная энергия,  $e$  — внутренняя энергия,  $P_v$  — давление при постоянном удельном объеме,  $h$  — теплосодержание (энтальпия),  $h = e + P_v$ ,  $S$  — энтропия рассматриваемого вещества,  $T$  — абсолютная температура.



Для обозначения абсолютной свободной энергии, когда точкой сравнения служит  $0\text{K}^1$ , пользуются символом  $f$ , а разность свободной энергии вещества в рассматриваемом состоянии и в состоянии сравнения — символом  $\Delta f$ . Свободная энергия сравнивается со свободной энергией чистой воды при температуре  $0^\circ\text{C}$  и при давлении 1 атм, находящейся на определенном условном нулевом высотном уровне, которым обычно считают уровень грунтовых вод, т. е.  $\Delta f$  чистой воды в этих условиях принимается за нуль. Абсолютная величина свободной энергии чистой воды равна  $1,5985 \text{ эрг/г}$ .

Основные свойства свободной энергии в первом приближении могут быть охарактеризованы следующим образом.

1. При приближении системы к равновесию ее свободная энергия уменьшается. В состоянии равновесия при определенном составе, давлении и температуре системы ее свободная энергия минимальна.

2. При постоянном давлении с повышением температуры свободная энергия увеличивается (численное значение этой отрицательной величины уменьшается). Отношение изменения свободной энергии к изменению температуры равно удельной энтропии почвенной влаги, взятой с обратным знаком. При этом свободная энергия и энтропия измеряются для свободной воды.

3. При постоянной температуре с увеличением осмотического давления раствора его свободная энергия уменьшается, а с увеличением гидростатического давления возрастает. Эти изменения по абсолютной величине равны, но различны по знаку.

4. Изменение свободной энергии частицы воды, расположенной в силовом поле, при ее движении равно величине компонента поля в этом направлении, взятой с обратным знаком. Таким образом, свободная энергия частицы воды возрастает, если частица движется против силового поля, и убывает, если она движется в направлении поля.

5. Всякий самопроизвольно происходящий процесс сопровождается уменьшением свободной энергии системы.

6. В равновесной системе свободная энергия компонента во всех фазах одинакова и может быть измерена в той фазе, в которой это удобнее выполнить технически. Поэтому свободную энергию почвенной влаги в равновесной системе можно вычислить, определив только давление водяного пара почвенной влаги. Она равна

$$\Delta f = RT \ln \frac{P}{P_0}, \quad (8)$$

где  $P$  — давление водяного пара почвенной влаги,  $P_0$  — давление водяного пара чистой воды при той же температуре и давлении,  $R$  — газовая постоянная, равная  $8,315 \cdot 10^7 \text{ эрг/моль}$ .

7. В неравновесной системе влага движется от точек с большей свободной энергией к точкам с меньшей ее величиной.

<sup>1</sup> К (кельвин) — единица температуры в системе СИ ( $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$ ,  $273\text{K} = 0^\circ\text{C}$ ,  $373\text{K} = 100^\circ\text{C}$ ).

Термодинамический анализ показывает, что одна из двух фаз (вода, лед), находящихся в равновесии при данной температуре и давлении, всегда исчезает, если температура или давление отклоняется от равновесной величины. Например, при увеличении температуры в условиях постоянного давления фаза, в которой удельная энтропия наименьшая, полностью исчезает, поскольку ее конечная свободная энергия после изменения температуры была бы наибольшей. В изотермических условиях при увеличении давления на систему вода—лед, находящуюся в равновесии, равновесие нарушится, так как свободная энергия льда увеличивается больше, чем свободная энергия воды, и лед растает. При понижении давления, наоборот, вся вода перейдет в лед. Изменение общего давления на лед и воду по отношению к равновесному на 1 атм понижает равновесную температуру замерзания на 0,0075°С. В случае когда давление в воде остается постоянным, а давление на лед меняется, увеличение давления на лед, равное 1 атм, понижает температуру замерзания на 0,0899°С. В случае когда давление на лед остается постоянным, а давление на воду увеличивается на 1 атм, температура замерзания повышается на 0,0824°С. Если изменение давления на воду и лед пропорционально их удельным объемам, то температура замерзания не изменяется. Когда к раствору добавляют растворимое вещество, в соответствии с увеличением осмотического давления свободная энергия раствора уменьшается, температура замерзания понижается, а температура кипения повышается.

Свободная энергия  $\Delta f$  ненасыщенных почв всегда отрицательна по отношению к общепринятому состоянию сравнения. Под вогнутой поверхностью

$$\Delta f = -\frac{2\sigma v}{r}, \quad (9)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости,  $v$  — удельный объем,  $r$  — радиус кривизны.

Для вогнутой поверхности радиус кривизны  $r$  — отрицательная величина, следовательно отрицательна и величина  $\Delta f$ . Чем суше почва, тем больше кривизна поверхности почвенной влаги (так как с уменьшением влажности почвы уменьшаются размеры заполненных водой капилляров) и тем меньше ее свободная энергия (абсолютная величина больше). Только в том случае, когда почва полностью насыщена водой, свободная энергия почвенной влаги приблизительно равна нулю. Поэтому почвенная влага всегда перемещается из более влажной почвы в более сухую: из точек с большей величиной свободной энергии к точкам с меньшей ее величиной.

В изотермических условиях суммарная величина свободной энергии почвенной влаги складывается из четырех компонентов

$$\Delta f_{ST} = RT \ln \frac{P}{P_0} = \Delta f_{sS} + \Delta f_{pS} + \Delta f_{oS} + \Delta f_{FS}. \quad (10)$$

В этом уравнении индекс  $S$  указывает, что уравнение относится к почвенной влаге,  $T$  — температура, при которой определяется свободная энергия,  $\Delta f_{sS}$  — компонент, зависящий от поверхностного натяжения и радиуса кривизны поверхности раздела вода—воздух,  $\Delta f_{PS}$  — компонент, зависящий от гидростатического давления в жидкости, прилегающей к твердой частице, вызванного адсорбционными силами, окружающими частицу, а также давлением любых других внешних сил (он не включает ту составляющую давления, которая связана с поверхностным натяжением и кривизной поверхности раздела вода—воздух),  $\Delta f_{OS}$  — компонент, зависящий от осмотического давления растворенных веществ,  $\Delta f_{FS}$  — компонент, характеризующий пребывание воды в адсорбционном силовом поле, окружающем почвенную частицу, а также в гравитационном поле земли.

Чтобы оценить суммарную свободную энергию  $\Delta f_{ST}$  при любой температуре, необходимо каждый из четырех компонентов выразить через температуру, измерить  $\Delta f_{ST}$  при двух различных температурах и выразить свободную энергию почвенной влаги при любой температуре через ее экспериментально установленные значения при этих двух температурах:

$$\Delta f_{ST} = \left( \frac{T_1 \Delta f_{ST_2} - T_2 \Delta f_{ST_1}}{T_1 - T_2} \right) + \left( \frac{\Delta f_{ST_1} - \Delta f_{ST_2}}{T_1 - T_2} \right) T, \quad (11)$$

где  $\Delta f_{ST}$  — свободная энергия почвенной влаги,  $T_1$  и  $T_2$  — температура двух измерений свободной энергии,  $\Delta f_{ST_1}$  — экспериментально найденная величина свободной энергии при температуре  $T_1$ ,  $\Delta f_{ST_2}$  — то же при температуре  $T_2$ .

Для иллюстрации применения уравнения (11) Эдлефсен и Андерсон [261] приводят пример со следующей группой исходных данных: при  $T_1 = 280\text{K}$  свободная энергия  $\Delta f_{ST_1}$  почвенной влаги для некоторой влажности равна, по измерениям,  $-3 \cdot 10^7$  эрг/г, при  $T_2 = 300\text{K}$  и той же влажности  $\Delta f_{ST_2} = -2 \cdot 10^7$  эрг/г.

Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta f_{ST} &= \frac{280(-2 \cdot 10^7) - 300(-3 \cdot 10^7)}{280 - 300} + \frac{(-3 \cdot 10^7) - (-2 \cdot 10^7)}{280 - 300} T = \\ &= -17 \cdot 10^7 + 5 \cdot 10^5 T. \end{aligned}$$

Следовательно, свободная энергия  $\Delta f_{ST}$  испытываемого образца при температуре  $273\text{K}$  равна  $\Delta f_{ST_{273}} = -17 \cdot 10^7 + 5 \cdot 10^5 \cdot 273 = -3,35 \times 10^7$  эрг/г. Это результат наиболее общего анализа, в котором учтены все известные в настоящее время факторы. Однако чаще опираются на другое уравнение, более физически и математически обоснованное и позволяющее величину парциальной молярной свободной энергии компонента выразить как функцию поддающихся измерению параметров. Это уравнение имеет вид

$$d\bar{G}_T = \bar{V} dP_e + \bar{V} dp + d\alpha + d\omega_a + d\omega_0 + Mg^* dh, \quad (12)$$

где  $\bar{G}_T$  — свободная удельная парциальная энергия, или полный термодинамический потенциал почвенной влаги,  $\bar{V}$  — удельный объем почвенной влаги,  $P_e$  — внешнее давление,  $p$  — менисковое давление,  $a$  — член, характеризующий участие сорбционных сил, источником которых является поверхность частиц,  $\omega_a$  — доля осмотического давления, создаваемая обменными катионами,  $\omega_0$  — доля осмотического давления, создаваемая солями, содержащимися в почвенном растворе,  $M$  — молекулярный вес воды,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $h$  — высота над условным уровнем сравнения.

Первый и последний члены этого уравнения обычно доступны для непосредственного измерения. Приближенно  $d\omega_0$  можно получить с помощью измерения электропроводности почвенного раствора. Отдельно каждый из трех членов  $\bar{V}dp$ ,  $da$  и  $d\omega_a$  измерить нельзя, но сумма их, взятая с обратным знаком, равна натяжению почвенной влаги (капиллярное, или каркасное натяжение, сосущая сила), которое может быть измерено тензиометром или мембранным прибором Ричардса. В практической работе используют упрощенное уравнение

$$d\bar{G}_T = \bar{V} dP_e + \bar{V} dP_s + d\omega_0 + Mg dh, \quad (13)$$

где  $\bar{V}dP_s = \bar{V}dp + da + d\omega_a$ . Это уравнение относится к изотермическим условиям и не учитывает гистерезиса.

Исходя из того что в равновесной многофазной системе свободная энергия всех фаз одинакова, свободную энергию влаги в почве при данном увлажнении определяют с помощью свободной энергии водяного пара, находящегося в равновесии с почвой. Это гораздо проще и легче сделать путем измерений давления пара и расчета величины свободной энергии по формуле (8).

Однако на кривых зависимости давления водяного пара в почве от ее влажности, полученных Эдлефсоном и Томасом, обнаруживается заметный перегиб при влажности, близкой к влажности устойчивого завядания. При влажности почвы выше этого предела давление пара практически не зависит от влажности почвы, оно равно давлению пара над свободной водой. Таким образом, этот метод может быть использован для определения свободной энергии при низкой влажности и непригоден при исследовании свободной энергии почвенной влаги в условиях увлажнения, нормального для произрастания сельскохозяйственных культур (в пределах влажность завядания — наименьшая влагоемкость). Положение о том, что все фазы вещества при одинаковой температуре и давлении имеют одну и ту же свободную энергию, лежит в основе методов определения свободной энергии по осмотическому давлению.

В качестве основного термодинамического параметра при количественных исследованиях энергетических зависимостей системы вода — почва пользуются также функцией, называемой «полный потенциал». Этот параметр аналогичен функции свободной энергии (Гиббсовой свободной энергии) как в количественном отношении,

так и по размерности. Он является суммой четырех частных потенциалов: осмотического, гравитационного, капиллярного (каркасного) и пневматического.

Комиссией по разработке терминов VII Международного почвоведческого конгресса даны следующие определения этих функций.

1. Полный потенциал почвенной влаги — работа, которая должна быть затрачена (в расчете на 1 г чистой воды) для того, чтобы обратимо и изотермически перенести в заданную точку почвы бесконечно малое количество воды из объема чистой воды, находящегося при атмосферном давлении и на условном высотном уровне сравнения.

2. Частные потенциалы:

а) осмотический потенциал — работа, которая должна быть затрачена (в расчете на 1 г чистой воды) для того, чтобы обратимо и изотермически перенести бесконечно малое количество воды из объема чистой воды, находящегося при атмосферном давлении на условном высотном уровне сравнения, в объем, содержащий раствор, тождественный по составу с почвенным раствором (в заданной точке), но во всех остальных отношениях тождественный с объемом, взятым для сравнения.

б) гравитационный потенциал — работа, которая должна быть затрачена (в расчете на 1 г чистой воды) для того, чтобы обратимо и изотермически перенести бесконечно малое количество воды из объема, содержащего раствор, тождественный по составу с почвенным раствором, и находящегося на условном высотном уровне сравнения при атмосферном давлении, в подобный же объем, который находится на высотном уровне заданной точки в почве.

в) каркасный (капиллярный) потенциал — работа, которая должна быть затрачена (в расчете на 1 г чистой воды) для того, чтобы обратимо и изотермически перенести бесконечно малое количество воды из объема, содержащего раствор, тождественный по составу с почвенным раствором, и находящегося на том же высотном уровне и при том же внешнем газовом давлении, что и в заданной точке в почве, в почвенную влагу в этой точке.

г) потенциал внешнего газового давления (пневматический потенциал) приходится принимать во внимание только в тех случаях, когда давление внешнего газа отличается от атмосферного, как, например, в мембранном прессе.

Для изотермических условий полный потенциал при записи в интегральной форме [48] представлен уравнением

$$\mu_{BT} = \mu_s + \mu_c + \mu_e + \mu_g, \quad (14)$$

где  $\mu_{BT}$  — полный потенциал почвенной влаги,  $\mu_s$ ,  $\mu_c$ ,  $\mu_e$ ,  $\mu_g$  — составляющие полного потенциала, связанные с капиллярно-сорбционными свойствами твердой фазы, с содержанием растворимых солей, с внешним давлением и с относительным положением в поле силы тяжести соответственно.

Полное изменение потенциала почвенной влаги представлено дифференциальным уравнением

$$d\mu_z = v_b dP_e - v_b dP_s - s_b dT + d\omega(C_c) + g dz. \quad (15)$$

Здесь  $\mu_b$ ,  $v_b$ ,  $s_b$  — удельные величины (отнесенные к 1 г компонента), остальные обозначения те же, что и в уравнении (14).

Таким образом, в изотермических условиях полное изменение потенциала воды в почве определяется четырьмя компонентами, составляющими потенциал влаги: а) капиллярно-сорбционным  $v_b dP_s$ , связанным с капиллярно-сорбционными свойствами твердой фазы, б) осмотическим  $d\omega(C_c)$ , связанным с содержанием растворимых солей, в) гидростатическим  $v_b dP_e$ , связанным с внешним давлением, г) гравитационным  $g dz$ .

Если происходит обмен массой (в рассматриваемый объем почвы поступает вода, соли или изменяется их состав), то для термодинамического описания системы необходимо добавить член  $\mu_i$ , характеризующий изменение энергии системы за счет изменения концентрации или состава ее компонентов.

Величину  $\mu_i$ , характеризующую изменение свободной энергии системы, вызываемое исключительно изменением содержания данного компонента при постоянных значениях всех остальных компонентов, называют парциальной удельной свободной энергией компонента  $i$ , или его химическим потенциалом. Величина химического потенциала может быть отнесена к молю (молярная) или грамму (удельная) компонента.

При постоянном внешнем давлении  $P_e$ , температуре  $T$  и содержании растворимых солей  $C_c$ , характерных для небольших отрезков времени в полевых условиях, изменение потенциала почвенной влаги целиком определяется изменениями каркасного (капиллярного) потенциала, а поскольку последний связан только с влажностью почвы, то в конечном счете — изменением влажности почвы:

$$\mu_b = f(W), \quad (16)$$

где  $\mu_b$  — потенциал почвенной влаги,  $W$  — влажность почвы. Эта зависимость обладает гистерезисом и поэтому обычно рассматривается отдельно для ветви увлажнения и ветви обезвоживания.

Постоянство  $\mu_b$ , являющееся необходимым и достаточным условием термодинамического равновесия в изотермической системе, может быть обеспечено различным сочетанием влажности, содержания растворимых веществ, сложения почвы и положения уровня грунтовых вод.

Таким образом в обычных полевых условиях полный потенциал почвенной влаги может быть выражен уравнением

$$\Phi = \psi + \omega + \lambda, \quad (17)$$

где  $\psi$  — капиллярный потенциал,  $\omega$  — гравитационный,  $\lambda$  — осмотический.

Потенциал — это работа, его размерность  $L^2T^{-2}$ . Измеряется он в эргах или джоулях на 1 г или 1 кг почвы соответственно. Часто его выражают также в сантиметрах водного столба, в атмосферах или барах. Как правило, измеряется не абсолютный потенциал воды, а относительный, равный разности потенциала в данной системе и в стандартной, в качестве которой обычно принимают чистую свободную воду на высоте сравнения при стандартных давлении и температуре. Чаще всего полный потенциал воды в почве ниже потенциала свободной чистой воды на высоте сравнения, т. е. он отрицателен. Вышеприведенные определения полного и частных потенциалов сформулированы в предположении постоянства объема и температуры системы.

Подобно свободной энергии почвенной влаги величины потенциалов влаги различных взаимосвязанных зон почвы стремятся выравниваться. Независимо от того, находится ли вода в жидком, парообразном или твердом состоянии, влага всегда будет двигаться из зон с высоким потенциалом в зоны с более низким, пока их значения не уравниваются. При этом в пункте с более высоким потенциалом (от которого движется вода) потенциал уменьшается на величину, соответствующую работе, которую совершит вода при движении. Почвенная влага в соответствии с уменьшением потенциала при уменьшении влажности почвы всегда будет передвигаться из зоны, где влажность выше, в зону, где влажность ниже. Это движение обуславливает выравнивание влажности подобно тому, как теплопроводность стремится выравнивать температуру. Поэтому поток почвенной влаги можно выразить как функцию влажности почвы.

Поток воды в почве в соответствии с гиперболической зависимостью коэффициента влагопроводности<sup>1</sup> от потенциала быстро уменьшается с уменьшением влажности почвы, поскольку при этом пленки воды и заполненные капилляры становятся тоньше и малочисленнее.

Скорость потока воды в почве при данном градиенте потенциала определяется влагопроводностью почвы, которая зависит не только от влажности почвы, но и от ее механического состава и сложения. При влажности, близкой к насыщению, песчаные почвы имеют более высокую проводимость, чем почвы тяжелого механического состава. При более низкой влажности (ниже наименьшей влагоемкости) проводимость глинистых почв самая высокая, суглинков несколько ниже, а песчаных — самая низкая.

В настоящее время для системы почва—вода не существует единого обобщенного термодинамического уравнения, достаточно детального и практически применимого. Существует много рабочих конечных уравнений, соответствующих конкретным особенностям рассматриваемой системы. Основное затруднение формулировки таких уравнений связано с поиском действительно независимых и в то же время поддающихся практическому измерению

<sup>1</sup> Коэффициент влагопроводности — объем воды, проходящий через единицу перпендикулярной ему поверхности в единицу времени.

параметров. Чем сложнее система, тем труднее найти подходящую группу параметров.

Учитывая все влияющие на свободную энергию факторы (температуру, давление, концентрацию растворенных веществ, влажность, энергию поверхности, адсорбционные силы, гравитационное поле и др.), необходимо выбрать такую группу переменных, которая учитывала бы воздействие всех перечисленных факторов без пропусков и повторений.

Ни один из существующих подходов не дает полностью удовлетворительных для практики результатов, поскольку в общем случае невозможно подобрать группу полностью независимых и поддающихся практическому определению параметров, описывающих систему. В настоящее время ограничиваются вычислением термодинамического потенциала по значению равновесного давления пара или путем измерения и последующего суммирования отдельных составляющих полного потенциала.

Экспериментальные методы определения потенциала почвенной влаги условно подразделяются на прямые и косвенные. Из прямых методов, однозначно определяющих полный потенциал влаги  $\mu_p$ , получили распространение следующие.

1. Гигроскопический метод, — наиболее простой и широко распространенный. Он основан на том, что в закрытой изотермической равновесной системе химический потенциал компонента одинаков во всех фазах. В этих условиях потенциал почвенной влаги  $\mu_p$  однозначно связан с влажностью воздуха  $\phi$ .

Для определения полного потенциала почвенной влаги этим методом небольшие навески почвы, 8—10 г, помещают тонким слоем на дно бюкса и ставят в эксикатор. Пользуясь насыщенными растворами солей или водными растворами серной кислоты, в эксикаторе создают атмосферу с требуемой относительной влажностью (относительная влажность воздуха и потенциал воды над насыщенными растворами применяемых солей или водными растворами серной кислоты определяются по соответствующим таблицам). Образцы почвы выдерживаются в эксикаторе до достижения постоянного веса, после чего, высушивая при температуре 105°С, определяют равновесную влажность образцов, соответствующую данному  $\mu_p$ .

Этот метод прост, однако он пригоден для определения потенциала почвенной влаги лишь при низкой влажности почвы. Для определения потенциалов выше —3000 Дж/кг (—30 атм) он применяться не может.

2. Психометрический метод также требует установления равновесия между влажностью образца почвы и относительной влажностью воздуха в опытной камере. В этом случае относительная влажность воздуха измеряется психометрическим методом.

Для расчета полного потенциала почвенной влаги  $\mu_p$  используется формула

$$\mu_p = -\frac{RT}{M} \ln \phi, \quad (18)$$



где  $R$  — газовая постоянная,  $T$  — температура в камере,  $M$  — молекулярный вес,  $\varphi$  — относительная влажность воздуха.

Этот метод требует высокой точности измерения психрометрической разности, порядка тысячных долей градуса Цельсия, что может быть обеспечено только при жестком термостатировании образца почвы и малой его навеске. Кроме того необходимо свести до минимума влияние смоченного термометра на атмосферу в камере.

В настоящее время для определения потенциала почвенной влаги описываемым методом наибольшее распространение получили терморпарные психрометры Ричардса и Огата, а также психрометры Пельтье с различными вариантами датчиков, измерительных камер, измерительных схем, термостатов и др.

3. Криоскопические методы, в основе которых лежат термодинамические зависимости, связывающие понижение температуры замерзания воды как компонента системы почва—вода с испытываемым ею эквивалентным давлением. Из криоскопических методов определения  $\mu_{\pi}$  наиболее распространены дилатометрический и метод Бекмана.

Дилатометрический метод предусматривает определение количества незамерзшей воды в капиллярно-насыщенном образце почвы при промораживании при различных отрицательных температурах.

По методу Бекмана понижение температуры замерзания почвенной влаги устанавливают, наблюдая за тепловыми эффектами, сопровождающими льдообразование в почве, точнее, наблюдая за ходом температуры в охлаждающемся образце почвы, куда введен какой-либо датчик температуры. Для этой цели наиболее часто используют металлические термопары или полупроводниковые термоспротивления — термистры.

4. Метод колонок — наиболее ранний метод определения потенциала почвенной влаги. Зависимость потенциала почвенной влаги  $\mu_{\pi}$  от ее влажности находят по распределению влажности почвы по высоте в капиллярно-насыщенной колонке. Колонка почвы увлажняется путем контакта ее нижнего торца со свободной водной поверхностью.

В изотермических условиях, когда пропитка закончена, испарение отсутствует, усадки не происходит, растворимые вещества свободно распределяются в почве и изменение внешнего давления по высоте неизмеримо мало, в вертикальной колонке капиллярно-сорбционная составляющая потенциала  $\mu_w$  компенсируется обратной по знаку гравитационной составляющей —  $gl$  и может быть вычислена по величине последней.

Метод колонок практически применим для определения потенциала почвенной влаги  $\mu_w$  от  $-10$  до  $-20$  Дж/кг, что соответствует примерно  $-0,1$ ,  $-0,2$  атм, или  $102$ — $204$  см водного столба.

5. Тензиометрический метод — единственный метод, допускающий возможность определения потенциала почвенной влаги в полевых условиях. Необходимыми элементами любой конструкции тензиометров являются пористый, обычно керамический, зонд с запол-

ненной водой соединительной системой, измеритель давления (манометр) и газовая ловушка.

Стенки зонда свободно пропускают воду и растворенные в ней вещества, но они непроницаемы для частиц почвы и объемного потока газа. Газонепроницаемость зонда определяется эквивалентным радиусом минимального просвета самой крупной его поры. Зонд и измерительная система вводятся в почву заполненными водой. Поэтому манометрическое давление в момент введения зонда в почву равно нулю. Благодаря водонасыщенным стенкам зонда почвенная влага и вода, заполняющая прибор, сообщаются друг с другом. Поскольку потенциал влаги в ненасыщенных почвах отрицателен, вода из зонда будет передвигаться в почву, что вызовет в зонде понижение давления, измеряемое манометрическим давлением, которое и является мерой потенциала почвенной влаги  $\mu_w$ . Таким образом, равновесие влаги в ненасыщенной почве и воды в зонде тензиометра достигается понижением потенциала воды в тензиометре до уровня потенциала воды в почве.

Предел применимости тензиометров теоретически близок к  $\mu_w$ , равному  $-1$  атм ( $-100$  Дж/кг). Но практически вследствие растворенного газа и водяного пара он не опускается ниже  $-0,85$  атм.

До установки тензиометра в почву необходимо определить давление проскока воздуха и гидравлическую проводимость зонда. Давление проскока воздуха должно быть не меньше  $1$  атм (диапазона измерения), а гидравлическая проводимость, определяющая скорость установления равновесия между прибором и почвой, не менее  $1$  мм/мин при перепаде давления  $1$  атм.

Измерителем давления в тензиометрах обычно служат ртутные манометры, вакуумметры типа манометра Бурдона, манометры сильфонного типа, а также преобразователи давления диафрагменного типа.

6. Метод мембранного пресса. Идея метода состоит в том, чтобы привести влагу ненасыщенной почвы в равновесие со свободной водой путем повышения потенциала почвенной влаги до уровня потенциала свободной воды.

Для измерения потенциала почвенной влаги исследуемый образец почвы помещается на водонасыщенную мембрану, поры которой обладают теми же свойствами, что и зонд тензиометра: они пропускают воду и растворимые в ней вещества, но пропуская частиц почвы и объемный поток газа. Мембрана покоится на жестком основании или сама является жесткой. Ее нижняя сторона контактирует со свободной водой, находящейся под атмосферным давлением. Контакт между влагой в образце почвы и водой в подмембранной камере осуществляется с помощью водонасыщенных пор мембраны. Он позволяет воде двигаться в направлении меньшего потенциала.

В мембранном прессе повышение потенциала почвенной влаги до уровня потенциала свободной воды осуществляется увеличением общего давления газа на почвенный образец. Мерой потенциала  $\mu_w$  является избыточное давление в верхней камере

меморанного пресса. Предельная величина этого давления определяется только размерами максимальных пор мембраны. При исследованиях в широком диапазоне  $\mu_w$  приходится пользоваться двумя мембранными прессами: в диапазоне  $\mu_w$  больше  $-100$ ,  $-200$  Дж/кг ( $-1$ ,  $-2$  атм) — керамическими мембранами, а при малых  $\mu_w$  — пленочными мембранами из целлофана или ацетон-целлюлозы, рассчитанными на высокое давление, до 30 атм.

Косвенные методы измерения потенциала почвенной влаги основаны на измерении какого-либо свойства пористого датчика, являющегося функцией влажности и находящегося в термодинамическом равновесии с почвенной влагой. Обычно в этих целях используются электропроводность, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость или вес датчика.

Из косвенных методов определения потенциала почвенной влаги наиболее распространен метод блоков электрического сопротивления, в основу которого положены зависимости между электрическим сопротивлением и влажностью пористого датчика и между влажностью и потенциалом влажности. В целях модулирования чувствительности датчиков при изготовлении блоков применяют комбинацию гипса с нейлоновой тканью или стекловолокно в гипсе.

Основными характеристиками блока являются диапазон сопротивления в рабочем интервале потенциала почвенной влаги  $\mu_w$ , форма калибровочной кривой и растекание тока. В диапазоне  $\mu_w < -30$  Дж/кг ( $-0,3$  атм) используются преимущественно гипсовые блоки (размером  $62 \times 34 \times 12$  мм), а при  $\mu_w > -30$  Дж/кг — блоки из нейлоновой ткани и гипса.

В настоящее время для описания энергетического состояния влаги в почвах и растениях нет единой терминологии и общепринятой системы единиц. Такие термины, как полное напряжение почвенной влаги, полное всасывающее давление,  $pF$ , капиллярный (матричный) потенциал, термодинамический потенциал и просто потенциал, применяемые по отношению к почвенной влаге, и дефицит давления диффузии (ДДД), всасывающее давление, сосущая сила, всасывающий потенциал, применяемые по отношению к воде в растении, по существу выражают свободную энергию (Гиббса) в почвенных и растительных системах.

Наиболее распространенными единицами измерения для потенциала влаги (свободной энергии) являются Дж/кг, а в системе CGS — эрг/г. Соотношение между ними таково:  $1 \text{ Дж/кг} = 10^4 \text{ эрг/г}$ ,  $0,1 \text{ Дж/г} = 10^6 \text{ эрг/г}$ .

Единицей измерения давления в системе CGS является бар (дин/см<sup>2</sup>). Кроме того, давление часто также измеряется в атмосферах, сантиметрах водного столба и миллиметрах ртутного столба. Соотношение между этими единицами таково: бар = дин/см<sup>2</sup>; сантиметр водного столба =  $1 \text{ г/см}^2 = 980 \text{ бар}$ ; миллиметр ртутного столба =  $1,35 \text{ г/см}^2 = 1313 \text{ бар}$ ; атмосфера физическая =  $1033 \text{ г/см}^2 = 1\,012\,340 \text{ бар}$ ; атмосфера техническая =  $1 \text{ кг/см}^2 = 980\,000 \text{ бар}$ .

В метеорологии употребляется другая единица с тем же названием бар, но в  $10^6$  раз большая, т. е. равная  $10^6$  дин/см<sup>2</sup>, тысячная ее доля — миллибар — равна  $10^3$  дин/см<sup>2</sup>. В иностранной литературе для измерения всасывающего давления почвы нередко тоже употребляется именно этот метеорологический бар. В этом случае соотношения между различными единицами давления и потенциалов для чистой свободной воды в стандартных условиях таковы (знак  $\approx$  обозначает, что единицы равны численно, но не равны по размерности):

$$1 \text{ атм} = 1,013 \text{ бар} = 1,013 \times 10^6 \text{ дин/см}^2 \approx 1033 \text{ см. вод. ст.},$$

$$1 \text{ бар} = 0,987 \text{ атм} = 10^6 \text{ дин/см}^2 \approx 1020 \text{ см. вод. ст.},$$

$$0,1 \text{ Дж/г} = 10^6 \text{ эрг/г} \approx 10^6 \text{ дин/см}^2 = 1 \text{ бар} \approx 1020 \text{ см. вод. ст.},$$

$$1 \text{ Дж/кг} = 10^4 \text{ эрг/г} \approx 10^{-2} \text{ бар} = 10^4 \text{ дин/см}^2 \approx 10,2 \text{ см. вод. ст.}$$

Все приведенные уравнения математического анализа движения почвенной влаги относятся к случаям движения воды в однородной пористой среде с одинаковой исходной влажностью, в изотермических условиях и с исключением гистерезисных явлений. Решение уравнения потока влаги даже в этих условиях оказывается очень сложным и трудным.

### *Глава III*

## **ПОТРЕБЛЕНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ РАСТЕНИЕМ**

В процессе жизнедеятельности растение непрерывно потребляет влагу, которую оно может добывать практически только из почвы в жидком виде при всасывании ее корнями.

В естественных условиях основных земледельческих районов нашей планеты, по крайней мере аридной зоны, процессы фотосинтеза, роста, а часто и развития сельскохозяйственных растений ограничиваются количеством воды, которую они могут извлечь из почвы и освоить.

К решению проблемы потребления влаги растением подобно проблеме передвижения ее в почве в настоящее время имеется два подхода: 1) изучение конкретных механизмов поступления и освоения влаги растением, опирающееся в основном на эксперимент; 2) термодинамический подход, основанный на изучении энергетического состояния и передвижения воды в системе почва — растение — атмосфера, опирающийся главным образом на математический расчет [46, 192, 210, 213, 214, 218, 255].

### **Механизм поступления почвенной влаги в растение**

Вода поступает в растение с помощью двух систем: нижней, корневой, и верхней, листовой. Корневая система обладает способностью активно нагнетать воду в растение. Специальным органом всасывания воды из почвы у растения являются корневые мочки — тончайшие окончания корней — и корневые волоски — особые выросты, сильно увеличивающие всасывающую поверхность корней.

Корневые мочки и волоски в точках соприкосновения с почвой, вступая в противодавление с водоудерживающей силой почвы, насасывают воду. Насасывание воды растением обусловливается диффузией воды в клеточный сок, который заполняет вакуоли или всю центральную полость растительной клетки. Сила, с помощью которой корневая система способна нагнетать воду (сила корневого всасывания), по своей природе является осмотической. В основе ее лежит разность осмотического давления в корневой системе (внутренний раствор) и в почвенной влаге (внешний раствор).

При прорастании растения в почве внешняя сила (водоудерживающая сила почвы), противостоящая осмотическому давлению

внутриклеточного раствора, складывается из осмотического давления почвенного раствора и сорбционных сил твердой части почвы. Она соответствует сумме осмотического и капиллярно-сорбционного потенциалов. Величина первого зависит от концентрации почвенного раствора, а второго — от механического состава почвы и ее влажности. В нормальных условиях произрастания сельскохозяйственных растений она обычно равна 1—2 атм. Такая величина обеспечивает возможность подъема воды и даже нагнетания ее в листья с силой в несколько десятых долей атмосферы.

Соппротивление корня проходящему через него потоку воды является важным фактором, регулирующим водообмен растения. Прежде всего вода, усвояемая корневой системой, должна пройти весьма короткий путь (десятые доли миллиметра) через живые клетки паренхимы корня, протоплазма которых — жидкое тело, состоящее из молекул и высокогидрофильных веществ. Прохождение воды через протоплазму — это процесс обмена молекул. На пути через паренхиму корня вода преодолевает весьма большие силы притяжения, удерживающие молекулы воды в гидратационных оболочках молекул веществ, из которых состоит протоплазма. Именно на этом коротком участке (десятые доли миллиметра) осмотические силы расходятся на преодоление сопротивления корня. За счет сопротивления этого участка пути в периоды интенсивной транспирации может возникать дефицит влажности листьев, который создает в листьях сосущую силу до 5—10 атм. Сопротивление, встречаемое током воды на основной части пути — в проводящей системе растения, состоящей из трахейд и сосудов (мертвых, пустых внутри клеток и их рядов), — весьма небольшое.

Если бы клетка могла неограниченно растягиваться, то насыщение воды клеткой шло бы до тех пор, пока концентрация воды снаружи и внутри клетки не уравнилась бы. Но так как клеточная оболочка обладает лишь ограниченной растяжимостью, то она, растягиваясь под влиянием поступающей воды, оказывает на содержимое клетки эластичное противодействие в направлении, противоположном направлению осмотического давления, стремящееся уравновесить его. Поступление воды в клетку будет продолжаться до тех пор, пока это противодействие — тургорное давление  $T$  — не уравновесит всю величину осмотического давления клеточного сока  $P$ . Следовательно, в каждый отдельный момент величина сосущей силы клетки  $S$  будет равняться разности между осмотическим давлением клеточного сока и тургорным напряжением растянутой оболочки, т. е.

$$S = P - T. \quad (19)$$

Именно эта разность, а не вся величина осмотического давления определяет поступление воды в клетку.

В тот момент, когда давление оболочки уравновесит осмотическое давление клеточного сока, дальнейшее увеличение объема клетки прекратится, наступит состояние равновесия — полное

насыщение клетки водой — и вода не будет ни входить в клетку, ни выходить из нее, как бы высока ни была концентрация клеточного сока.

Максимальная величина сосущей силы равна осмотическому давлению клеточного сока. Она соответствует моменту увядания растений, когда объем клеток становится наименьшим, а тургорное давление приближается к нулю (рис. 7). Таким образом, растительная клетка представляет собой как бы саморегулирующий осмотический механизм, который сосет воду тем сильнее, чем больше в ней нуждается [129].

Механизм работы верхней сосущей системы, листовой, тесно связан с испарением влаги растением — с процессом транспирации. Испаряют воду клетки паренхимы листа, сосущие воду из проводящих сосудов, окончания которых находятся в листе. В клетках листа, которые теряют влагу и становятся ненасыщенными водой, развивается сосущая сила, так же как и в клетках

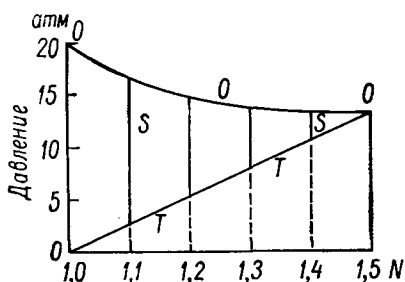


Рис. 7. Схема изменения осмотических величин в клетке при переходе от завядания к насыщению водой (по Н. А. Максиму).

*T* — тургорное давление, *O* — осмотическое давление клеточного сока, *S* — сосущая сила, *N* — относительный объем клетки.

корня, равная разности осмотического и тургорного давления. Таким образом, начальный путь воды в корне представляет собой несколько десятых долей миллиметра паренхимы корня, а конечный участок этого пути — несколько десятых долей миллиметра паренхимы листа.

Вода по проводящей системе способна подниматься на всю высоту растения, от корня до листа (в древесных растениях она составляет десятки метров), за счет огромного сопротивления воды на разрыв — сил сцепления, достигающих 223 атм, а по некоторым данным, даже 300—350 атм, и за счет отсутствия воздуха в проводящей системе растения.

В итоге всю воду, содержащуюся в растении, можно рассматривать как единое целое, связанное силами молекулярного сцепления и находящееся в состоянии термодинамического напряжения (отрицательного давления), создаваемого работой верхнего концевого двигателя [192].

Итак, механизм освоения почвенной влаги растением и происходящее в связи с этим передвижение ее в почве представляются в следующем виде. В процессе испарения надземные части растений расходуют огромное количество воды, вследствие чего в них появляются значительные сосущие силы. Возникающие в листьях,

эти силы через ряд промежуточных звеньев передаются корневой системе растений, создавая в ней недостаток насыщения. В результате недостатка насыщения (сосущей силы) каждый корневой волосок в точке стыка с почвой высасывает из нее воду. Вследствие создающихся разностей натяжения воды в обезвоженных точках стыка и в смежных с ними участках почвы вода передвигается к этим точкам, обеспечивая непрерывное пополнение их водой. При наличии достаточного количества легкоподвижной влаги в почве передвижение влаги к точкам стыка происходит с достаточной быстротой и влагопотребность растений удовлетворяется. При незначительном количестве или отсутствии легкоподвижной воды в почве частицы ее, находящиеся в соприкосновении с корневыми волосками, обезвоживаются, вследствие чего поступление воды в ткани растений все более и более сокращается, вызывая вначале лишь уменьшение содержания воды в тканях, а затем потерю их тургора и увядание.

### **Термодинамические условия передвижения воды в растениях**

При термодинамическом описании состояния и передвижения влаги в растениях предполагается, что в основном движение воды в растении происходит в результате диффузии, а система почва—растение—атмосфера рассматривается как термодинамическая непрерывность.

При описании поведения воды в растениях наиболее широко используется термин «диффузное давление». Майер (автор этого термина) рассматривает диффузное давление как физическое свойство вещества, определяющее его диффузию, если другие условия допускают его осуществление. Диффузное давление — результат разности энергии молекул чистого растворителя и растворителя в растворе. Оно может быть определено по свободной энергии вещества.

В качестве рабочей единицы используют дефицит давления диффузии ДДД, определяя ДДД воды в растворе как разность между давлениями в чистой воде и воды в растворе при той же температуре. По существу, ДДД выражает свободную энергию (потенциал) воды в растительных системах. В простейшей форме физический смысл ДДД проявляется в работе простого осмометра, находящегося в контакте с чистой водой при атмосферном давлении. Здесь ДДД равен разности гидростатических давлений, необходимой для того, чтобы предотвратить диффузию воды через мембрану осмометра.

Для растительных клеток ДДД зависит от концентрации растворенных веществ в вакуоле и механического давления в клетке:

$$\text{ДДД} = \text{ОП} - \text{ТД}, \quad (20)$$



где ОП — осмотический потенциал, ТД — тургорное давление, возникающее в результате эластичности стенок клетки. Это уравнение аналогично уравнению (19), а ДДД соответствует сосущей силе  $S$ . Уравнение (20) часто применяется не только для клетки, но также для тканей и даже для всего растения. В последнем случае его можно использовать для определения движения воды в растении.

Разность дефицитов давления диффузии в двух точках РДДД может рассматриваться как мера движущей силы. Тенденция к движению воды внутрь растения (или растительной клетки) может быть выражена как разность между суммами, составляющих ДДД внутри  $(\sum \text{ДДД})_i$  и снаружи  $(\sum \text{ДДД})_e$ , т. е.

$$\text{РДДД} = (\sum \text{ДДД})_i - (\sum \text{ДДД})_e. \quad (21)$$

Эта разность в крайних членах системы почва—растение—атмосфера равна  $\approx 1000$  атм. Из этой разности сравнительно небольшая величина, 20—30 атм, а в большинстве случаев даже меньше 20 атм, приходится на почву. Главная же часть этой разности приходится на последний участок системы — от мезофилла листьев через устьица к внешней атмосфере. Так, при относительной влажности воздуха 90% и температуре 20°С суммарное давление влаги<sup>1</sup> в нем равно —140 атм. Это означает, что воздух с такой относительной влажностью находился бы в равновесии с водным раствором какого-либо вещества, осмотическое давление которого равно —140 атм.

При более низкой влажности воздуха, обычно характерной для окружающей растение атмосферы в дневные часы, суммарное давление влаги в ней падает до тысяч атмосфер ниже нуля. В нормально же увлажненном растении суммарное давление бывает лишь на несколько атмосфер ниже нуля [214].

Предполагается, что разность дефицита давления диффузии РДДД эквивалентна давлению, определяющему направление и скорость переноса воды через растение. Это положение распространяется и на движение воды между почвой и растением, поскольку общее напряжение воды в почве (термодинамический потенциал, свободная энергия) аналогично по смыслу и по величине ДДД. Наиболее часто ДДД выражают в единицах давления (атмосферах, сантиметрах водяного столба) или в единицах энергии (джоулях).

При изучении переноса влаги во всей системе почва — растение — атмосфера может быть применен тот же подход, который до сих пор применялся преимущественно только к самой почве, а именно:

$$\text{поток} = \text{проводимость} \times \text{движущая сила}.$$

<sup>1</sup> При расчете величины суммарного давления влаги принимается, что при атмосферном давлении и температуре 20°С давление на поверхности чистой воды равно нулю.

Движущей силой в системе является градиент потенциала влаги от почвы через растение к атмосфере РДДД. На каждом участке пути поток воды должен меняться прямо пропорционально РДДД и обратно пропорционально сопротивлению потока. Рассматривая процессы передвижения влаги в почве, в растении и переход влаги в атмосферу, как взаимосвязанные, считают, что интенсивность потока воды по всей системе одинакова и что, по существу, она определяется процессом с наибольшим сопротивлением.

Как правило, наибольшее сопротивление в цепи почва—растение—атмосфера осуществляется при передвижении воды в газообразной фазе, включая участок диффузии через дворик и отверстие устьица, ламинарный слой, прилегающий к поверхности листьев, и турбулентный пограничный слой, где возникает разность упругости пара внутри устьиц и в воздухе над растением. Даже слабое воздействие, обуславливающее увеличение ДДД в одной точке цепи почва—растение—атмосфера, может вызвать значительное уменьшение тургора листьев и в результате—частичное закрытие устьиц. При этом сопротивление газообразной фазы возрастает и общий перенос влаги уменьшается. Существенный источник сопротивления может возникнуть также на поверхности соприкосновения почвы с корнями и на поверхности соприкосновения корней с древесиной.

Важным фактором, определяющим перенос воды, является и общее напряжение почвенной влаги ОНПВ (термодинамический потенциал почвенной влаги). ОНПВ непосредственно влияет на ДДД растения, причем ДДД не может быть меньше ОНПВ, так как градиент адсорбции из почвы в растение исчезает при равенстве ДДД и ОНПВ. ОНПВ оказывает и косвенное влияние на сопротивление корней в силу влияния обезвоживания на их проницаемость и опробкование. Обычно влияние сопротивления, которое влага встречает при переходе из почвы в корни, гораздо меньше, чем то, которое определяется низкой влагонепроводностью почвы, когда она не насыщена влагой.

В целом сопротивление движению воды через почву может быть существенным, способным ограничить перенос воды в растение.

ДДД—наиболее важная, пожалуй, однозначная характеристика связи воды с растением. Имеется три метода определения этой величины.

1. Метод жидкого обмена—метод погружения, предусматривающий уравнивание ДДД тканей и осмотического потенциала водных растворов различной концентрации.

2. Метод обмена пара, предусматривающий размещение образцов тканей листьев в ряд микроэксикаторов над растворами с заданным осмотическим давлением, а следовательно, и с заданной упругостью пара. Относительные прибавки или потери в весе образцов дают возможность определить ДДД.

3. Психрометрический метод, основанный на эффекте Пельтье. Этот метод может применяться только в лабораториях, оборудо-

ванных специальными термоэлектрическими психрометрами большой точности.

Для характеристики состояния и движения воды в растениях с успехом может быть использован также химический потенциал  $\mu$ .

Величина химического потенциала определяется из уравнения

$$\mu_i = \frac{\partial Q}{\partial n_i}, \quad (22)$$

где  $dQ$  — изменение термодинамического потенциала системы при изменении молярного содержания в системе компонента  $i$  на величину  $dn$ . Химический потенциал отличается от термодинамического потенциала размерностью: его размерность  $\frac{\text{энергия}}{\text{масса}}$ . Это делает возможным использовать его в качестве термодинамического потенциала переноса вещества. В системе из нескольких фаз вещество будет передвигаться из фазы, где химический потенциал выше, в фазу, где он ниже. Противоположное направление невозможно.

В растениях в качестве элементарной термодинамической системы принимают отдельную клетку, допуская, что внутри клетки между отдельными ее частями существует термодинамическое равновесие. О термодинамическом состоянии клетки можно судить по величине химического потенциала воды.

Химический потенциал воды  $\mu$  характеризуется абсолютной температурой  $T$  и давлением пара  $p$ :

$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{p}{p_0}, \quad (23)$$

где  $\mu_0$  — химический потенциал воды в стандартном состоянии при абсолютной температуре  $T$  и давлении 1 атм, при котором давление пара равно  $p_0$ ,  $R$  — газовая постоянная. Уменьшение энергии воды при изменении химического потенциала от  $\mu_0$  до  $\mu$  выражается формулой

$$\mu_0 - \mu = -RT \ln \frac{p}{p_0} \quad (24)$$

или

$$\mu_0 - \mu = RT \frac{p_0 - p}{p_0}, \quad (25)$$

откуда следует, что уменьшение энергии при данной температуре приблизительно пропорционально относительному понижению давления пара. Следовательно, относительное давление пара над системой, содержащей воду (раствор, коллоидальные золь или гель), можно использовать в качестве относительной меры химического потенциала воды в системе. В качестве такой меры в растворах

вместо относительного давления пара можно использовать осмотическое давление

$$O = \frac{RT}{V_0} \ln \frac{p}{p_0}, \quad (26)$$

где  $O$  — осмотическое давление,  $V_0$  — молекулярный объем воды;  $p_0$  и  $p$  — давление пара. В отношении количества энергии формула (26) соответствует формуле (25) для  $\mu$ .

Химический потенциал может быть использован для характеристики состояния и движения воды в растении и почве. Если почвенной воды недостаточно для того, чтобы обеспечить тургесцентность, т. е. если клеточные стенки напряжены неполностью, то часть осмотического понижения энергии остается некомпенсированной и возникает сосущая сила. Она может быть выражена уравнением, аналогичным уравнению (19)

$$S = O - W, \quad (27)$$

где  $S$  — сосущая сила,  $O$  — осмотическое давление,  $W$  — давление стенок (тургор). Сосущая сила  $S$  эквивалентна ДДД, если пользоваться теми же единицами, и она близка к величине химического потенциала, но имеет обратный знак.

В клетке с ограниченной тургесцентностью химический потенциал клеточного сока измеряется сосущей силой, а не осмотическим давлением. Только в совершенно вялой клетке, в которой  $W=0$ ,  $S$  будет равно осмотическому давлению, и можно в качестве термодинамического параметра, описывающего состояние воды в клетке, использовать осмотическое давление. (Для того, чтобы измерить сосущую силу, необходимо найти концентрацию раствора сахара, в которой клетки или ткани не поглощают и не теряют воду.)

При равновесии химический потенциал воды в клетке должен быть равен химическому потенциалу воды в среде. Для наземных растений этот уровень обычно определяется относительной влажностью воздуха у поверхности растения. Культурные растения, корни которых способны поглощать воду из тех почвенных слоев, где она имеет достаточно высокий потенциал, предохраняют себя от колебаний влажности атмосферы, и только во время засухи, когда потенциал почвенной влаги существенно понижается, растения повышают сосущую силу посредством понижения тургора или за счет увеличения осмотического давления. В любом случае увеличение сосущей силы сопровождается понижением химического потенциала воды в клетках. Для того чтобы вода переходила из почвы в растение и перемещалась внутри их, необходим градиент сосущей силы. Сосущая сила в растениях должна быть больше сосущей силы почвы, иначе растение не сможет извлекать воду из почвы.

Для правильного использования химического потенциала при характеристике состояния и движения воды в растениях необхо-

димо знать, каким образом на него влияют различные условия: температура, механическое давление, содержание различных веществ и их взаимодействие с водой, поле тяжести (гравитация), электрическое и магнитное поля и др.

Слабая изученность процесса передвижения влаги в растении на настоящем этапе не позволяет все факторы, влияющие на состояние влаги, выделить в отдельные члены и полностью обобщить и математизировать этот процесс. Пока лишь некоторые моменты процесса и то в самых общих чертах могут быть оценены с помощью термодинамического анализа.

## Глава IV

### АГРОГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

В течение уже многих лет в СССР и за рубежом делается немало попыток найти критерии, позволяющие из общего количества содержащейся в почве влаги выделить ее количества, равноценные в отношении условий водоснабжения растений, в первую очередь установить критерий, позволяющий выделить влагу, за счет которой формируется урожай.

Изучение взаимодействия воды с почвой, механизмов движения влаги и освоения ее растением приводит к заключению, что при изменении влажности почвы наблюдаются некоторые узловые точки, в которых поведение, свойства воды и доступность ее для растений резко меняются. При этом в почвах, различных по механическому составу, структуре, порозности и т. п. эти точки соответствуют разному количеству содержащейся в них влаги. Узловые точки, в которых резко меняются свойства и доступность для растений почвенной влаги называются агрогидрологическими константами.

В основу определения агрогидрологических констант положен принцип разделения почвенной влаги по степени связности, подвижности и доступности ее для растений. Именно этот принцип позволяет из общего количества содержащейся в почве влаги выделить ту ее часть, которая имеет одинаковую ценность для формирования урожаев сельскохозяйственных культур, и тем самым сравнить влажность различных типов почв.

В агрогидрологических исследованиях Гидрометслужбы СССР для оценки влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в настоящее время наиболее широко используются следующие агрогидрологические константы: недоступная влага — мертвый запас, влажность устойчивого завядания, влажность разрыва капилляров, наименьшая влагоемкость, капиллярная влагоемкость, полная влагоемкость.

#### Доступность почвенной влаги для растений

О доступности почвенной влаги для растений в настоящее время существуют противоречивые мнения. Нам кажется, что сущность этих противоречий в большинстве случаев кроется в двояком понимании термина «недоступная влага».

Одни в термин «недоступная влага» вкладывают понятие о количестве влаги, которое удерживается почвой с напряжением, превышающим сосущую силу растения, и которое поэтому не может быть использовано растением даже в самых благоприятных условиях произрастания.

Другие этому термину придают более широкий смысл, вкладывая в него понятие о количестве влаги, которое остается в почве неиспользованным в результате воздействия всех факторов окружающей растения среды: почвенных, метеорологических, биологических и др.

Таким образом, одним и тем же термином «недоступная влага» пользуются как при учете ресурсов доступной по своим свойствам для растения почвенной влаги, так и при выявлении возможности использования этих ресурсов при том или ином сочетании условий внешней среды. Вследствие многообразия возможных сочетаний факторов внешней среды в полевых условиях количество влаги, не использованное растением, вряд ли вообще может быть выражено одним показателем. Поэтому под термином «недоступная влага» целесообразно понимать только нижний предел доступности для растения почвенной влаги, определяемый свойствами почвенной влаги — водоудерживающей силой и подвижностью ее в почве. Именно в таком понимании этот термин введен в работу подразделений Гидрометслужбы СССР еще в 1935 г. [30].

**Недоступная влага — мертвый запас.** Из механизма освоения почвенной влаги растением очевидно, что вся влага, удерживаемая в почве силами, большими осмотического давления клеточного сока корневых мочек и волосков, не может быть отнята растением из почвы даже в момент полного увядания растения. Следовательно, абсолютным пределом доступной растениям почвенной влаги является влажность почвы в момент полного увядания растений — потери тургора не только надземной частью, но и всасывающими клетками корней. У культурных растений в этих условиях обезвоживание надземной части, начинающей увядать значительно раньше корней, так велико, что в результате необратимых процессов изменения структуры плазмы растение гибнет. Остающуюся в этот момент в почве влагу называют недоступной влагой, или мертвым запасом. Предел освоения растением почвенной влаги практически соответствует количеству прочносвязанной воды.

Количество прочносвязанной воды определяется по теплоте смачивания и максимальной гигроскопичности почвы.

В первом случае учет прочносвязанной воды производится по количеству теплоты, выделяемой при смачивании абсолютно сухой почвы, которое пропорционально количеству связываемой воды и составляет 2000—3000 г/(кал·моль) адсорбированной воды. Теплота смачивания не зависит от структуры почвы, а почти всецело определяется дисперсностью ее и комплексом поглощенных катионов. Выделение теплоты смачивания прекращается примерно при давлении почвенной влаги — 49,5 атм. Эта константа определяется calorиметрическим методом. В связи с его сложностью метод оп-

ределения количества прочносвязанной воды по теплоте смачивания редко используется.

Учет прочносвязанной воды по максимальной гигроскопичности основан на способности сухой почвы сорбировать (поглощать) на поверхности своих частиц водяные пары из окружающего воздуха, т. е. на ее гигроскопичности. Количество водяного пара, сорбируемого почвой, зависит от природы почвы и от относительной влажности воздуха, с которым она соприкасается. Чем больше относительная влажность, тем большее количество влаги сорбирует

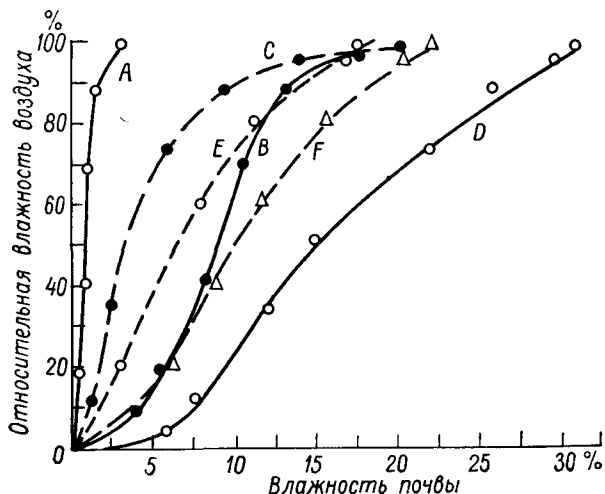


Рис. 8. Кривые зависимости количества адсорбированной почвой парообразной влаги от относительной влажности воздуха [267].

A — рыхлый песок (глины 7,27%), B — суглинок тяжелый (глины 47,6%), C — коллоиды латеритов, D — коллоиды черноземов, E — глина, насыщенная калием, F — глина, насыщенная кальцием.

почва, а при одной и той же относительной влажности воздуха поглощение влаги будет тем больше, чем выше содержание коллоидных частиц в почве. Кроме того, в адсорбционной способности почвы большое значение имеет природа обменных катионов: почва, насыщенная калием, адсорбирует больше воды, чем почва, насыщенная кальцием; при высокой же упругости водяного пара наибольшее количество воды адсорбирует почва, насыщенная натрием [230]. Доказательством этого служат кривые, представленные на рис. 8.

Количество воды, сорбируемое почвой при относительной влажности воздуха, близкой к его насыщению (около 100%), называется максимальной гигроскопичностью почвы. Максимальная гигроскопичность почвы определяется ее удельной поверхностью: чем больше удельная поверхность почвы, тем больше ее максимальная гигроскопичность.



Наиболее распространенным методом определения максимальной гигроскопичности является насыщение воздушносухой почвы в вакууме над 10-процентной серной кислотой при температуре 20° С, что обеспечивает относительную влажность воздуха 96% и соответствует осмотическому давлению около —50 атм. (т. е. очень близкому к давлению, при котором прекращается выделение теплоты смачивания). Для создания вакуума (он удаляет адсорбированный воздух и тем самым ускоряет процесс насыщения почвы влагой) может быть использовано специальное оборудование, например, вакуум Камовского или чашки, в которых производится проверка анероидов, что обеспечивает возможность разрежения воздуха до давления 30—40 мм ртутного столба [200].

Вследствие малой удельной поверхности частицы почвы размером более 1 мм практически не гигроскопичны, поэтому максимальная гигроскопичность определяется лишь для мелкоземной части почвы, т. е. для частиц менее 1 мм.

При определении максимальной гигроскопичности следует тщательно следить за постоянством температуры, так как даже небольшое ее понижение при такой высокой влажности в вакууме может вызвать термическую конденсацию и зависит результаты.

Количество связанной воды, определяемое по максимальной гигроскопичности, несколько больше, чем при определении по теплоте смачивания. Объясняется это тем, что максимальная гигроскопичность, найденная при упругости пара, близкой к насыщению, в самых узких порах почвы, кроме адсорбированной воды, всегда содержит некоторое количество капиллярно-конденсированной воды.

Более простым (без вакуума), но уступающим в точности определения максимальной гигроскопичности, является метод Николаева. По этому методу почва насыщается в эксикаторе над насыщенным раствором сернокислого калия, относительная упругость водяного пара над которым равна 98%. Вследствие отсутствия вакуума почва насыщается значительно медленнее, в течение 30—40 дней. Взвешивание бюксов производится через 5—7 дней.

Таблица 3

**Максимальная гигроскопичность минеральных почв (в процентах веса абсолютно сухой почвы), полученная разными методами**

Метод	Дерново-подзолистый песок	Дерново-подзолистая супесь	Дерново-подзолистый средний суглинок	Обыкновенный суглинистый чернозем	Приазовский суглинистый чернозем	Обыкновенный глинистый чернозем
По Николаеву . .	0,8	2,6	6,2	10,0	12,4	15,2
Над 10%-ной серной кислотой . .	0,6	2,2	5,4	8,5	10,6	13,0
Отношение . . .	1,33	1,18	1,15	1,18	1,17	1,17

Исследования, проведенные Л. А. Разумовой в 1960 г. в агрогидрологической лаборатории Центрального института прогнозов (ЦИП), показали, что величины максимальной гигроскопичности, полученные методом Николаева, как и следовало ожидать, для всех типов почв выше, чем при насыщении над 10-процентной серной кислотой. Отношение этих величин во всех случаях весьма устойчиво, в среднем составляет 1,17 (табл. 3). Единственный случай, когда оно значительно отклонилось и достигло 1,33, относится к крупнопесчаным почвам с очень низкой максимальной гигроскопичностью, равной 0,6%. Возможно, это обусловлено большими относительными ошибками определения столь малых величин гигроскопичности, как 0,6—0,8%.

Как видно из данных табл. 3 и 4, максимальная гигроскопичность разных типов почв очень различна. В минеральных почвах она колеблется от десятых долей процента у песчаных почв до 10—15% у глинистых. Максимальная гигроскопичность органических (торфяных) почв составляет 30—40% и выше.

Таблица 4

**Максимальная гигроскопичность различных типов почв над 10%-ной серной кислотой (в процентах веса абсолютно сухой почвы)**

Песок . . . . .	0,5—1,0
Супесь . . . . .	1,0—3,0
Суглинок	
легкий . . . . .	3,0—5,0
средний . . . . .	4,0—7,0
тяжелый . . . . .	6,0—9,0
Глина . . . . .	9,0—15,0
Торф низинного болота . . . . .	30,0—40,0

За последние годы сделано немало попыток определения недоступной влаги по потенциалу почвенной влаги (свободной энергии, общему напряжению влаги в почве и другим энергетическим показателям). На основе зависимости потенциала от влажности различных типов почв пределом доступности влаги для растений в первом приближении можно считать потенциал около —50 атм.

**Влажность устойчивого завядания и методы ее определения.** Важнейшей агрогидрологической константой по праву считается влажность устойчивого завядания — предел увлажнения почвы, ниже которого формирование урожаев сельскохозяйственных культур прекращается.

Полевыми и лабораторными опытами АГМИ и ряда периферийных подразделений в различных почвенно-климатических районах страны было установлено, что прирост, а следовательно, и формирование урожаев осуществляется только при влажности почвы выше некоторого предела [141, 173]. Этот предел у различных почв разный. Он совпадает с минимальной влажностью почвы, необходимой для поддержания тургора листьев в условиях минимальной

транспирации (около 100% относительной влажности воздуха) и максимальной населенности корнями, близок к коэффициенту увядания Бриггса и Шанца [292] и почвенной влажности устойчивого завядания С. И. Долгова [67]. При такой влажности растения не восстанавливают тургор до тех пор, пока в почву не будет добавлена вода.

Поглощение растением влаги из почвы ограничивается, с одной стороны, сосущей силой их корневых мочек и волосков, с другой — общим напряжением и подвижностью почвенной влаги. Оно тесно связано с работой, требующейся для извлечения влаги из почвы.

Сосущая сила корней большинства сельскохозяйственных растений в соответствии с осмотическим давлением в период их роста колеблется в пределах 5—10 атм [129]. Лишь у дикорастущих растений, обитающих в крайне сухих условиях и на засоленных почвах, она достигает 50—80 и даже 100 атм.

У одного и того же растения осмотическое давление корней несколько меняется во времени в связи с колебаниями температуры. Но эти изменения невелики, поскольку они пропорциональны абсолютной температуре, по отношению к которой колебания температуры в период вегетации растений составляют всего лишь около 5%.

Общее напряжение влаги в почве и ее подвижность в первую очередь являются функцией влажности почвы. По мере уменьшения влажности требуется все большая и большая работа для извлечения влаги из почвы, а восполнение использованной влаги в точках стыка почвы с корнями становится все более медленным. Вследствие этого с уменьшением влажности почвы при прочих равных условиях растение добывает все меньшее и меньшее количество воды.

Происходящий изо дня в день процесс транспирации растений приводит к уменьшению содержания воды в клетках и тканях растений, в связи с чем дефицит диффузного давления (ДДД) в них повышается, а тургорное давление автоматически уменьшается. Остаточный дефицит каждого дня зависит от соотношения транспирации и поглощения воды из почвы растением.

Недостаток поступления влаги сначала вызывает лишь уменьшение содержания воды в растении, в дальнейшем же приводит и к потере тургора. Влажность почвы, при которой тургор растений не восстанавливается даже в воздухе, близком к насыщению водяными парами, называется влажностью устойчивого завядания, или коэффициентом завядания<sup>1</sup>. Влажность устойчивого завядания выражается в процентах веса абсолютно сухой почвы. При этой влажности вследствие увядания у растений прекращается накопление растительной массы, а тем самым, и урожая. Хотя растения могут извлекать почвенную влагу и до влажности, меньшей, чем влажность устойчивого завядания, до предела недоступной влаги — мертвого запаса, однако при таком увлажнении они уже не могут

---

<sup>1</sup> Авторы в дальнейшем пользуются этими терминами как равнозначными.

нормально функционировать и накапливать урожай. Поэтому влажность устойчивого завядания считается важнейшей агрогидрологической константой.

Различия в сосущей силе корней сельскохозяйственных растений в зависимости от их вида и сорта не могут существенно сказываться на влажности устойчивого завядания, поскольку подвижность почвенной влаги определяется только количеством ее в почве и свойствами почвы, а ОНВП при влажности почвы, близкой к влажности устойчивого завядания, меняется гораздо быстрее, чем влажность почвы у этого предела.

По многочисленным данным как отечественных, так и зарубежных исследователей, устойчивое завядание сельскохозяйственных растений наблюдается при ОНВП от  $-10$  до  $-20$  атм и чаще всего соответствует  $-15$  атм, т. е. реальные отклонения ОНВП от наиболее часто встречающейся величины составляют всего лишь  $\pm 5$  атм. Это означает, что на легких почвенных разностях влажность устойчивого завядания в зависимости от вида и сорта растений колеблется в пределах, меньших  $0,1\%$ , на суглинистых — от  $0,1$  до  $0,2\%$  и на глинистых — всего лишь в пределах  $0,3\%$  веса абсолютно сухой почвы<sup>1</sup>, т. е. в пределах, не превышающих точность определения ОНВП и влажности почвы. Отсюда можно заключить, что все сельскохозяйственные растения высушивают почву практически до одного и того же уровня. Становится ясным и тот, казалось бы, парадоксальный факт, что влажность устойчивого завядания определяется прежде всего свойствами почвы, а не свойствами растений [129, 130].

Влажность устойчивого завядания как нижний предел влажности почвы, способный обеспечить прирост, а тем самым и формирование урожаев, следует отличать от влажности почвы, при которой происходит увядание растений вследствие либо неблагоприятного сочетания факторов внешней среды, либо неудовлетворительного состояния растений. Такое увядание растений может наблюдаться при любой влажности почвы, о чем уже говорилось выше, в разделе о недоступной влаге.

Влажность устойчивого завядания различных почв весьма различна: чем мелкоземистее и богаче гумусом почва, тем она выше. Влажность устойчивого завядания примерно соответствует всему количеству имеющейся в данной почве связанной воды, т. е. сумме прочно- и рыхлосвязанной воды (табл. 5).

Из данных табл. 5 следует, что влажность устойчивого завядания для песков не превышает  $1,5\%$ , для суглинков она колеблется от  $4$  до  $12\%$ , на глинистых почвах достигает  $20\%$ , а на органических превышает  $50\%$  веса абсолютно сухой почвы. Следует говорить, что влажность устойчивого завядания в период вегетации растений несколько изменяется в связи с изменением температуры почвы, поскольку подвижность влаги увеличивается, а вязкость

<sup>1</sup> Расчеты выполнены по кривым зависимости общего натяжения почвенной влаги  $pF$  от влажности почвы.

и водоудерживающая сила с повышением температуры уменьшаются. К концу лета влажность устойчивого завядания ниже, чем весной. Однако эти изменения невелики. По нашим расчетам, выполненным на основе данных о температуре почвы, они колеблются около 5% величины влажности.

Таблица 5

**Влажность устойчивого завядания (в процентах веса абсолютно сухой почвы) различных типов почв, по данным гидрометстанций СССР**

Песок . . . . .	0,5—1,5
Супесь . . . . .	1,5—4,0
Суглинок	
легкий . . . . .	3,5— 7,0
средний . . . . .	5,0— 7,0
тяжелый . . . . .	8,0—12,0
Глина . . . . .	12,0—20,0
Торф низинного болота . . . . .	40,0—50,0

Вследствие приведенных выше огромных различий в величинах коэффициентов завядания для оценки условий водоснабжения сельскохозяйственных культур, произрастающих на разных почвах, сопоставимой можно считать лишь влагу, имеющуюся в них сверх влажности устойчивого завядания. Так как накопление растительной массы и формирование урожая (продукции) осуществляется лишь за счет этой влаги (сверх коэффициента завядания), ее принято называть продуктивной влагой [141].

Количество продуктивной влаги вычисляется по разности между всей имеющейся в почве влагой и количеством ее, соответствующим коэффициенту завядания. Таким образом, влажность устойчивого завядания приравнивается к нулю. Естественно, что эта нулевая точка должна быть определена для каждой почвы и глубины, для которых определяется влажность. Существуют прямой и косвенный методы определения коэффициента завядания.

Прямой, лабораторно-вегетационный, метод заключается в том, что учитывается влажность почвы в тот момент, когда выращиваемое растение с хорошо развитой корневой системой устойчиво увядает из-за иссушения почвы, все же остальные факторы произрастания оптимальны, и когда тургор не восстанавливается даже в темном помещении при относительной влажности воздуха, близкой к 100%, пока в почву не будет добавлена вода.

Коэффициент завядания определяется на растениях, выращиваемых в специально приспособленных сосудах, защищенных от испарения с поверхности почвы пергаментом, залитым сверху парафином. Так как вид растения-индикатора практически не влияет на величину коэффициента завядания, для его определения можно пользоваться любым растением, ярко реагирующим на недостаток почвенной влаги и дающим возможность наиболее безошибочно и

быстро по внешнему виду определить момент устойчивого завядания [269, 292, 330].

При исследованиях в Гидрометслужбе СССР в качестве растения-индикатора взят овес [141]. Момент увядания овса, как и других зерновых культур, бывает наиболее ярко выражен, когда растение находится в листовой фазе (до выхода в трубку) и пластинки листьев хорошо развиты. Опыт показал, что это может быть обеспечено в условиях, когда объем почвы, рассчитываемый на одно растение, составляет около 70 см<sup>3</sup>. Большой объем приводит к тому, что растения за время пребывания в листовой фазе не успевают использовать всю влагу и до увядания переходят в фазу трубки, когда момент увядания весьма трудно определить. Малый же объем не обеспечивает нормального роста растений, вследствие чего растение не дает хорошо развитой листовой поверхности и момент увядания его затушевывается.

Чтобы обеспечить проникновение корней на всю глубину, сосуд не должен иметь высоту более 10 см, иначе на дне его остается неиспользованная влага, в результате чего коэффициент завядания может оказаться значительно завышенным. Материал, из которого сделаны сосуды, должен обладать малой теплопроводностью. В противном случае коэффициент завядания может быть завышен вследствие дистилляции влаги при термической конденсации. Наиболее удобными сосудами являются стеклянные стаканчики высотой около 10 см и диаметром 3 см, в которых выращивается по одному растению.

Коэффициент завядания желательно определять на живых почвах, т. е. вскоре после взятия образцов в поле. Особенно строго это правило следует соблюдать для засоленных почв, красноземов и желтоземов, которым свойственна большая прочность агрегатов в отношении воды — неразмокающая структура. До посадки растений в каждый сосуд вносятся в виде раствора питательные вещества и вода в количестве, полностью обеспечивающем потребность растений. При составлении питательной смеси необходимо учитывать характер исследуемой почвы. Для обеспечения нормальной ассимиляции подопытные растения должны быть хорошо освещены рассеянным светом, так как прямые солнечные лучи могут вызвать временное увядание растений, которое ошибочно может быть принято за устойчивое.

Для предохранения от конденсации влаги на стенках сосудов следует помещать их, во избежание резких колебаний температуры, в ящики с ватой, опилками или каким-либо другим теплоизолирующим материалом, желательно в помещении с влажностью воздуха, близкой к 70%.

Закладку опытов по определению коэффициента завядания следует начинать со времени установления весной средней суточной температуры воздуха 15° С и заканчивать не позже перехода температуры воздуха через этот же предел осенью, исключая отсюда жаркий период, с температурами выше 25° С. Опыт по определению влажности завядания считается законченным, когда листья растения

устойчиво увяли, их тургор не восстанавливается даже при помещении растений в темное место с влажностью воздуха, близкой к насыщению. Сосуд с таким увядшим растением в тот же день распаковывается, из него удаляется верхний 1—2-сантиметровый слой почвы и корни, после чего высушиванием при 105° С определяется влажность вынутой из него почвы. Полученная величина, выраженная в процентах веса абсолютно сухой почвы, является влажностью устойчивого завядания, или коэффициентом завядания. Она соответствует количеству содержащейся в почве прочной и рыхлосвязанной воды в сумме с некоторым количеством капиллярной воды (воды единичного клина).

В тех случаях, когда в силу каких-либо причин не может быть использован прямой метод, применяются косвенные методы определения коэффициента завядания. Для этого пользуются установленными ранее соотношениями коэффициента завядания с другими агрогидрологическими константами, характеризующими количество связанной и неподвижной воды в почве. Наиболее часто в этих целях используют соотношение между коэффициентом завядания и максимальной гигроскопичностью.

По массовым сопряженным определениям (более 500) коэффициентов завядания описанным выше лабораторно-вегетационным методом и максимальной гигроскопичности в вакууме над 10-процентной серной кислотой, для почв Европейской территории СССР коэффициент завядания в среднем равен максимальной гигроскопичности, умноженной на 1,34 [141]. Примерно такой же коэффициент получается и по расчетам на основе данных, снятых с влажностных кривых. Совершенно очевидно, что при других методах определения максимальной гигроскопичности этот коэффициент может быть иным, например, по методу Николаева он равен 1,14. Отдельными авторами получены как большие, так и меньшие коэффициенты от 1,1 до 2,2 [170]. Большие значения получены для сильно засоленных почв в силу токсического действия солей на растения.

Не исключена возможность сильных отклонений в соотношениях коэффициента завядания и максимальной гигроскопичности вследствие нарушения методики определения как той, так и другой константы.

Так, например, максимальная гигроскопичность определялась только для мелкозема (без внесения поправок на крупнозем), коэффициент же завядания определялся, как и полагается, для всей почвы, без отсева, либо максимальная гигроскопичность определялась не при должной температуре, без вакуума и т. д.

Методика определения коэффициента завядания наиболее часто нарушается вследствие необеспеченности какого-либо, кроме влаги, фактора произрастания растений, например недостаточной освещенности, когда опыт производится поздней осенью или зимой, а также в закрытых помещениях, резких колебаний температуры, незащищенности от нагрева прямыми солнечными лучами, повреждений и заболеваний подопытных растений и др.

Еще в 20-х годах был предложен косвенный дилатометрический метод определения коэффициента завядания [271], согласно которому влажность устойчивого завядания соответствует количеству воды, не замерзающей при температуре  $-1,5^{\circ}\text{C}$ .

Примерно в это же время А. В. Трофимов [224], а несколько позже и А. В. Думанский [69, 70] предложили количество связанной<sup>1</sup> влаги в почве определять по нерастворяющему объему. Наилучшие результаты получаются при растворах сахара и спирта. Расчет производится на основе учета изменения концентрации раствора до взаимодействия его с почвой, влажность которой была предварительно определена, и после взаимодействия. По мнению Трофимова, нерастворяющий объем для естественных концентраций почвенного раствора лежит между одинарной и двойной максимальной гигроскопичностью почвы. Так как резкой границы между растворяющей и нерастворяющей водой не существует, а она представляет собой какой-то слой частичного растворения, то метод нерастворяющего объема может считаться лишь ориентировочным.

Бригс и Шанц [292] считали возможным коэффициент увядания вычислять по эквиваленту влажности делением последнего на 1,84. Эквивалент влажности является мерой количества воды, удерживаемого первоначально насыщенную почвой после центрифугирования в течение 30 мин с ускорением  $1000\text{ g}$  ( $\text{g}$  — ускорение силы тяжести). При определении эквивалента влажности существенную роль играет стандартизация процедуры. При одном и том же количестве оборотов центрифуги и при той же продолжительности центрифугирования явно выражена зависимость эквивалента влажности от подготовки почвы: размельчение почвы и уменьшение образца резко увеличивает эквивалент влажности.

В настоящее время широко используется определение влажности устойчивого завядания по потенциалу почвенной влаги, рассчитываемому по упругости водяного пара в почве.

В насыщенных почвах давление водяного пара приблизительно равно давлению пара над свободной водой. Поэтому кривая зависимости потенциала влажности почвы почти параллельна оси абсцисс. С уменьшением влажности в связи с поступлением воздуха в поры почвы давление пара, хотя и очень медленно, начинает уменьшаться, а кривая зависимости потенциала от влажности приобретает небольшой уклон к оси абсцисс, который остается практически постоянным до тех пор, пока не будет достигнута некоторая влажность, характерная для данной почвы. С этого момента давление пара уменьшается быстрее, чем влажность почвы. Согласно имеющимся данным, эта точка перегиба приходится на тот узкий диапазон влажности почвы, в котором проявляется устойчивое увядание растения, т. е. растения не могут функционировать нормально, пока не увеличится влажность почвы [261].

---

<sup>1</sup> Связанной считается та часть почвенной влаги, которая не принимает участия в изменении концентрации растворов при взаимодействии их с почвой.



Потенциал, рассчитанный по упругости пара в точке перегиба, равен примерно —15 атм. Поэтому в целях унификации методов определения влажности устойчивого завядания многие ученые предлагают в качестве показателя влажности устойчивого завядания принять потенциал —15 атм.

Поскольку все приведенные выше соотношения между коэффициентом завядания и другими константами получены эмпирически, ими можно пользоваться лишь для почв, не очень резко отличающихся от тех, для которых они выведены.

### Влагоемкость почв

Способность почв удерживать в себе влагу ограничена ее свойствами, условиями залегания и глубиной стояния грунтовых вод. Максимальное количество влаги, которое способна удерживать в себе почва в полевых условиях, называется ее влагоемкостью.

Исследования влагоемкости почв в полевых условиях начались еще в конце прошлого столетия [75]. В начале двадцатого столетия П. С. Коссович [103] впервые дал теоретические и экспериментальные обоснования понятия влагоемкости почв. В последующем большой вклад в изучение этой важнейшей константы почв был внесен работами А. Ф. Лебедева [116—119], С. И. Долгова [66, 67], А. А. Роде [187—193], С. В. Астапова [13, 14] и др.

В настоящее время в полевых условиях в зависимости от глубины залегания водного зеркала в почве различают полную, капиллярную и наименьшую влагоемкость.

**Полная влагоемкость.** Количество воды, содержащееся в почве в момент, когда зеркало грунтовых вод достигает поверхности почвы и все почвенные поры заняты водой, называется полной влагоемкостью. Полная влагоемкость вычисляется по общей скважности следующим образом. Объем почвенных пор  $v_{пр}$  при естественном сложении почвы равен

$$v_{пр} = v_{об} - v_{пч}, \quad (28)$$

где  $v_{об}$  — общий объем образца почвы при естественном ее сложении,  $v_{пч}$  — объем, занятый твердой фазой почвы в этом образце (все величины в  $см^3$ ).

Объем, занятый твердой фазой почвы данного образца, составляет

$$v_{пч} = \frac{p}{d}, \quad (29)$$

где  $p$  — вес абсолютно сухой почвы в данном образце (г),  $d$  — удельный вес почвы.

Подставляя в формулу (28) значение  $v_{пч}$ , получаем

$$v_{пр} = v_{об} - \frac{p}{d}. \quad (30)$$

Отсюда общая скважность  $\Pi$ , которую принято выражать в процентах объема образца почвы при естественном ее сложении, т. е.  $v_{об}$ , будет

$$\Pi = 100 \frac{v_{пр}}{v_{об}}. \quad (31)$$

Используя уравнение (30), получаем

$$\Pi = 100 \frac{v_{об} - \frac{p}{d}}{v_{об}} = 100 \left( \frac{v_{об}}{v_{об}} - \frac{p}{v_{об} d} \right) = 100 \left( 1 - \frac{p}{v_{об} d} \right). \quad (32)$$

В уравнении (32)  $p/v_{об}$  — объемный вес почвы  $q$ , т. е. вес абсолютно сухой почвы в  $1 \text{ см}^3$  с ненарушенным ее строением. Следовательно,

$$\Pi = 100 \left( 1 - \frac{q}{d} \right). \quad (33)$$

Полная же влагоемкость  $U$ , выраженная в процентах абсолютно сухой почвы, численно будет равна

$$U = \frac{\Pi}{q}. \quad (34)$$

Для определения объемного веса в поле берутся образцы почвы в естественном ее сложении специально сконструированными бурами, рабочая часть которых представляет собой тонкостенные цилиндры строго определенного объема.

Вес абсолютно сухой почвы взятого образца равен разности веса его в поле и количества имеющейся в нем воды, а объемный вес почвы — отношению веса абсолютно сухой почвы к объему цилиндра. Необходимый для вычисления общей скважности удельный вес почвы, как и всякого сыпучего тела, определяется пикнометрическим методом.

Описанный метод вычисления полной влагоемкости почвы по общей скважности и объемному весу более надежен, чем метод экспериментального определения путем полного насыщения небольших монолитов почвы влагой. Последний метод (непосредственного определения) сопряжен с неизбежными ошибками вследствие того, что в процессе выемки монолитов из ванны с водой из них всегда вытекает некоторое количество влаги. Кроме того, при насыщении в почве всегда остается заземленный воздух, а поэтому величина полной влагоемкости оказывается заниженной.

**Капиллярная влагоемкость.** С этого момента, когда уровень грунтовых вод отрывается от поверхности почвы и опускается все ниже и ниже вглубь, часть почвенной влаги, подчиняясь силе тяжести, из некапиллярных пор просачивается вниз. В результате в слое почвы, лежащем выше уровня грунтовых вод, остается лишь капиллярная вода, удерживаемая менисковыми силами. Высота столба этой воды равна  $0,15/r$ . По мере снижения уровня грунтовых вод будет опораживаться все большее количество пор,

и вода будет оставаться в более мелких порах. В конце концов при достаточно глубоком залегании уровня грунтовых вод в верхних слоях почвы в основном останется лишь влага открытых капилляров. Описанный слой повышенной влажности, т. е. слой капиллярного увлажнения, который принято называть капиллярной каймой, движется, таким образом, соответственно перемещению уровня грунтовых вод. Причем мощность капиллярной каймы (ее высота) для одной и той же почвы практически постоянная и определяется водоподъемной способностью почвы. Количество почвенной влаги, содержащейся в капиллярной кайме, на различных высотах от уровня грунтовых вод различно. Наибольшее ее количество содержится в слое почвы, непосредственно примыкающем к зеркалу грунтовых вод.

Некоторые исследователи [31, 198] влажность самого нижнего десятисантиметрового слоя называют максимальной капиллярной влагоемкостью. Наибольшее количество влаги, которое может удерживать в себе весь слой почвы, расположенный над зеркалом грунтовых или почвенно-грунтовых вод, называется капиллярной влагоемкостью почвы. Она также обычно выражается в процентах веса абсолютно сухой почвы.

Для характеристики капиллярной влагоемкости находят капиллярную кривую, т. е. кривую распределения влаги в капиллярной кайме, начиная от зеркала грунтовых вод и кончая верхней границей каймы. Для этого производят полевые определения влажности почвы до зеркала грунтовых вод в такие периоды года, когда из капиллярной каймы не расходуется сколько-нибудь заметное количество влаги и когда в нее не стекает гравитационная вода. Если капиллярная кайма залегает так глубоко, что корни растений в нее не проникают, определение капиллярной кривой можно производить в течение почти всей теплой части года. Лучше всего такие определения организовать на участках черного пара, где нет расхода влаги на транспирацию.

Так как водоподъемная способность почвенно-грунтовой толщи может быть неодинаковой в разных ее слоях, то и капиллярную кривую следует определять при нескольких характерных уровнях грунтовых вод.

Пример нахождения капиллярной кривой представлен на рис. 9 [191]. На нем изображены кривые распределения влажности темноцветной почвы западин Прикаспийской низменности под естественной растительностью для нескольких моментов летнего периода, положение уровня грунтовых вод (УГВ) для этих же моментов и влажность, соответствующая верхней границе капиллярной каймы [наименьшая влагоемкость (НВ)]. Точки пересечения кривых распределения влажности с линией НВ являются верхней границей капиллярной каймы. На рисунке видно, что мощность капиллярной каймы в данном случае была равна (см):

18 IV . . .	644—296 = 348	17 VII . .	650—336 = 314
17 V . . .	650—326 = 324	21 VIII . .	666—330 = 336
16 VI . . .	650—326 = 324	4 X . . .	640—316 = 324

Таким образом, мощность капиллярной каймы в данном случае колебалась в очень небольших пределах, практически была постоянной. Исключением является первый срок (18 IV), когда в слое почвы под капиллярной каймой содержалось еще много непросочившейся после снеготаяния гравитационной воды. Различие

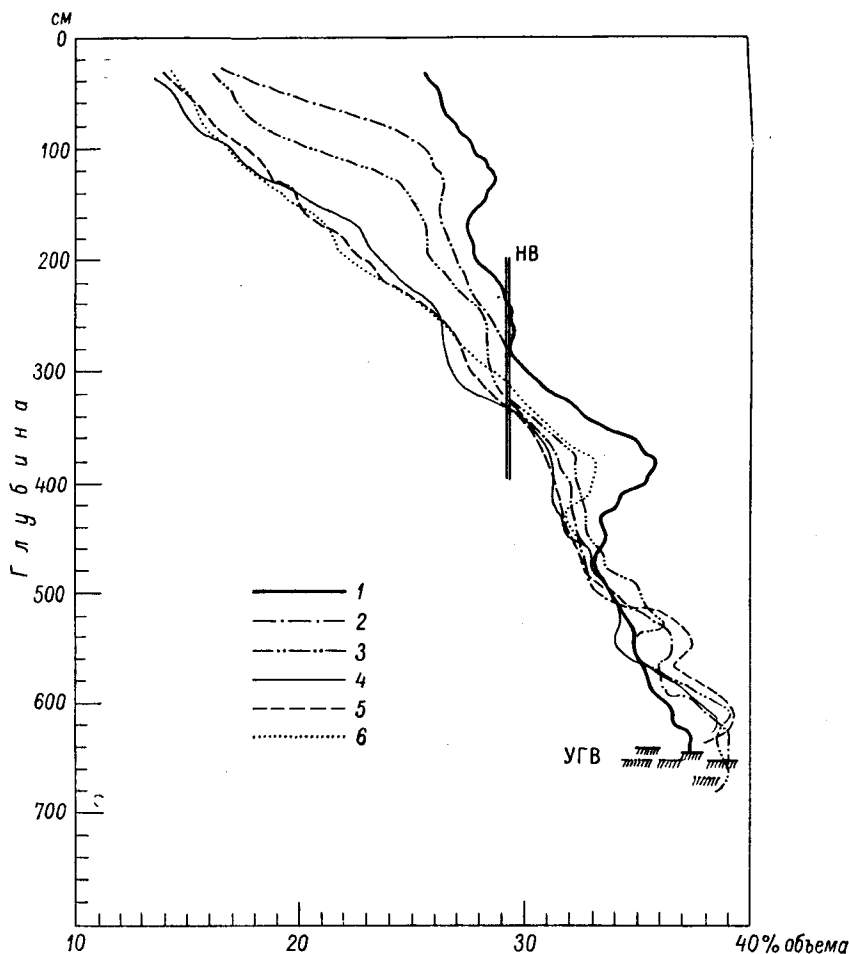


Рис. 9. Верхняя граница капиллярной каймы и ее мощность [193].

Распределение влажности в 1951 г.: 1—18 IV, 2—17 V, 3—16 VI, 4—17 VII, 5—21 VIII, 6—4 X, НВ—наименьшая влагоемкость, УГВ—уровень грунтовых вод.

во влажности у нижней и верхней границ капиллярной каймы в данном случае составляло около 10 мм (10% объема почвы, или 8% веса абсолютно сухой почвы).

Мощность капиллярной каймы и влажность почвы в ней на одной и той же высоте от водного зеркала у разных почв весьма

различны. Чем мелкоземистее почва, тем больше мощность капиллярной каймы и выше ее влажность, причем на крупноземистых почвах верхняя граница каймы выражена очень ярко, на мелкоземистых переход постепенный. Это было показано еще работами Лебедева [119] при промачивании почвенных колонок (табл. 6).

Таблица 6

**Распределение влажности в почвенных колонках после промачивания  
(в процентах веса абсолютно сухой почвы)**

Высота (см)	Крупный песок	Мелкий песок	Лёсс	Высота (см)	Крупный песок	Мелкий песок	Лёсс
190	1,91	2,39	25,32	90	2,09	2,64	28,53
180	2,03	2,40	22,85	80	2,13	2,74	29,17
170	1,99	2,38	22,97	70	2,11	2,75	28,63
160	1,89	2,54	23,98	60	2,44	3,01	29,24
150	1,94	2,48	24,44	50	2,23	6,55	33,06
140	2,04	2,41	24,38	40	3,61	11,70	33,03
130	2,11	2,48	23,17	30	13,51	15,30	34,70
120	1,99	2,80	26,01	20	14,02	18,01	31,65
110	2,04	2,65	26,24	10	14,99	18,25	33,33
100	1,95	2,71	28,26	0—1	14,78	19,45	34,52

**Наименьшая влагоемкость.** Она соответствует максимальному количеству воды, удерживаемой почвой вне воздействия грунтовых вод, т. е. над капиллярной каймой. В тонкозернистых почвах и грунтах вода удерживается каждым элементарным слоем с помощью сил, присущих самому этому слою. В природе наименьшая влагоемкость соответствует влажности почвы после обильного насыщения ее водой и стекания избытка этой воды в условиях, исключающих испарение и капиллярное увлажнение за счет почвенно-грунтовых и грунтовых вод. Таким образом, наименьшая влагоемкость представляет собой максимальное количество воды, которое при отсутствии растений и физического испарения может быть запасено в почве в условиях свободного дренирования. Она характеризует максимально возможное содержание подвешенной влаги.

Наименьшая влагоемкость определяется по влажности почвы, измеренной после того, как нисходящее движение воды после насыщения почвы становится неощутимо медленным. Точность определения наименьшей влагоемкости зависит от времени измерения влажности после насыщения почвы водой. В некоторых почвах очень трудно определить момент, а следовательно, и влажность, при которой скорость перераспределения воды становится исчезающе малой. К ним относятся тяжелые суглинки. На кривых влажность—время не обнаруживается резкого перелома для этих почв [46]. На иловатых суглинках и песке, по измерениям с помощью нейтронного влагомера, перелом заметен и во времени, и по глубине.

Прежде считали, что наименьшая влагоемкость находится в определенном соотношении с эквивалентом влажности, которым первоначально пытались характеризовать водоудерживающую способность почв при глубоком залегании грунтовых вод. На самом же деле оказалось, что у разных почв отношение наименьшей влагоемкости к эквиваленту влажности различно: для среднесуглинистых почв оно близко к единице, для легких почв больше единицы, для тяжелых суглинистых почв меньше единицы [294, 325]. А. Ф. Лебедев [119] предлагал водоудерживающую способность почв при глубоком залегании грунтовых вод характеризовать ее максимальной молекулярной влагоемкостью. Исходя из представления о колоссальной величине градиентов молекулярных сил он считал возможным приравнять влагоемкость почв к количеству влаги, остающейся в насыщенной почве после центрифугирования ее с ускорением, равным  $18\,000\,g$  (метод центрифугирования), или к количеству влаги, остающейся в почве после полного ее контакта с фильтровальной бумагой. Последний наиболее быстро осуществляется при применении пресса (метод пресса). Сильное центрифугирование ускоряет стекание избыточной воды из почвы и, таким образом, определяет тот верхний предел влажности почвы, где уже начинается действие молекулярных сил. Дальнейшие исследования выявили несоответствие наименьшей влагоемкости почвы ее максимальной молекулярной влагоемкости [67, 189]. В связи с этим наименьшую влагоемкость почв в настоящее время определяют лишь полевым методом.

Наиболее надежным методом определения наименьшей влагоемкости можно считать метод залива площадок. По этому методу наименьшую влагоемкость определяют на всю глубину корнеобитаемого слоя, но не менее  $1,5\,м$  [200]. Расчет количества воды, необходимого для залива площадки, производится по формуле

$$Q = 2 \frac{(U_n - w) q s h}{100}, \quad (35)$$

где  $Q$  — количество необходимой для залива воды ( $м^3$ ),  $U_n$  — предполагаемая наименьшая влагоемкость корнеобитаемого слоя почвы (% веса абсолютной сухой почвы),  $w$  — влажность корнеобитаемого слоя почвы перед заливом площадки (% веса абсолютно сухой почвы),  $q$  — объемный вес корнеобитаемого слоя почвы ( $г/см^3$ ),  $s$  — площадь заливаемой площадки ( $м^2$ ),  $h$  — глубина корнеобитаемого слоя почвы ( $м$ ).

Через некоторое время после залива площадок, необходимое для стекания гравитационной воды, приступают к определению влажности почвы, т. е. собственно к определению наименьшей влагоемкости. Просачивание гравитационной влаги происходит довольно медленно, особенно на тяжелых почвах. Поэтому влажность почвы определяется несколько раз, пока разница между предыдущим и последующим значениями не уменьшится до  $1-1,5\%$  в пределах всего корнеобитаемого слоя. Первое определение влажности

принято производить через сутки после залива площадок, второе — на легких супесчаных почвах через 2—3 суток, на тяжелых суглинистых через 5—7 суток после первого. Если расхождение во влажности превысит 1,5%, через сутки влажность определяется еще раз.

Бурение производится в центре площадки, каждый раз в четырехкратной повторности. Пробы почвы берутся через каждые 10 см на всю глубину корнеобитаемого слоя. Результаты последнего определения влажности почвы принимаются за ее наименьшую влагоемкость. Она выражается в процентах веса абсолютно сухой почвы.

На величину наименьшей влагоемкости оказывает некоторое влияние температура почвы. При такой высокой влажности, как наименьшая влагоемкость, критерием, определяющим состояние почвенной влаги, является капиллярное натяжение. По данным международных критических таблиц, зависимость поверхностного натяжения от температуры выражается соотношением

$$\sigma_T = 117 - 0,152T, \quad (36)$$

где  $\sigma_T$  — выражается в дин/см, а температура  $T$  — в кельвинах. На основании этой зависимости и реально существующих изменений температуры почвы от весны к лету можно ожидать, что в большинстве районов сельскохозяйственной зоны СССР в период вегетации сельскохозяйственных культур наименьшая влагоемкость метрового слоя почвы уменьшается примерно на 10—15 мм.

Если в почвенном профиле имеются труднопроницаемые горизонты при заливе воды с поверхности почвы, промачивание всего корнеобитаемого слоя путем залива не всегда бывает возможно вследствие медленного впитывания влаги почвой. На таких почвах наименьшая влагоемкость часто определяется ступенчато. Кроме площадки, заливаемой с поверхности, закладывают вторую площадку на глубине 70—80 см. Для этого выкапывают шурф глубиной 70—80 см, площадью 1—2 м<sup>2</sup>. Почву на дне шурфа слегка разрыхляют и дно шурфа заливают водой с расчетом на промачивание до глубины более 2 м. Так как освобожденный от давления верхний слой почвы этого шурфа получает возможность несколько разбухать и тем самым увеличивать свою влагоемкость, то влагоемкость слоев почвы до глубины 70—100 см берется по данным первой площадки, а по данным площадки, заложенной в шурфе, определяется влагоемкость лишь для слоев почвы глубже 100 см [13].

Еще работами Лебедева было установлено, что в слоистых почво-грунтах (мелкоземистые слои подстилаются крупноземистыми, например, глина подстилается песком) после просачивания влаги и установления водного равновесия влажность вышележащего мелкоземистого слоя значительно больше, чем в однородных. Это объясняется тем, что размер почвенных пор в подстиляющем крупноземистом слое значительно больше, чем в соприкасающемся с ним мелкоземистом слое.

Вследствие этого в местах соприкосновения слоев действуют менисковые силы, не присущие самим почвенным слоям, а развивающиеся на границе их стыка. В результате действия этих сил в нижней части мелкоземистого слоя образуется слой повышенной влажности. По своей природе слой повышенной влажности родствен капиллярной кайме. Роль зеркала грунтовых вод здесь играет поверхность раздела вода—воздух на нижнем конце капилляров вышележащего мелкоземистого слоя.

Схема изменения влажности при промачивании слоистых почвогрунтов представлена на рис. 10 [191, 193]. Пусть начальная влажность в трехметровой толще близка к влажности завядания (кривая 1). Допустим, что эта толща начинает сверху промачиваться, причем распределение влаги в последовательные моменты будет характеризоваться кривыми 2, 3 и 4. Кривая 4 соответствует моменту, когда влажность во всем верхнем наносе достигла свойственной ему величины наименьшей влагоемкости. Кривые 5, 6 и 7 изображают три следующие стадии промачивания, которые уже сопровождаются накоплением подперто-подвешенной влаги над границей смены наносов, нарастанием мощности слоя, содержащего эту влагу, скоплением и одновременно нарастанием влажности в вышележащих слоях. Кривая 7 соответствует максимально возможному содержанию подперто-подвешенной влаги в пределах глубин 80—200 см. Как видно на рисунке, содержание подперто-подвешенной влаги, в отличие от наименьшей влагоемкости, не остается постоянным по глубине, нарастает книзу. По достижении максимального содержания подперто-подвешенной влаги дальнейшее поступление влаги уже вызывает просачивание ее в нижние наносы. Влажность же верхнего наноса остается постоянной (кривая 7). Она может быть принята в качестве второй величины для характеристики влагоемкости двухчленных наносов в полевых условиях при глубоком залегании грунтовых вод. А. А. Роде называет ее второй, большей, величиной наименьшей влагоемкости верхнего наноса, в отличие от первой величины наименьшей влагоемкости, обусловленной водоудерживающей способностью самого этого слоя до тех пор, пока в нем не скопилась подперто-подвешенная влага. Обе рассмотренные константы имеют большое практическое значение, поскольку в природных условиях водоудерживающая способность описанных слоистых почв при неполном промачивании будет характеризоваться наименьшей влагоемкостью  $HВ_1$ , а при избыточном — второй, большей, величиной  $HВ_2$ . Как показали исследования последних лет, разница между этими величинами достигает больших значений. Так, А. Ф. Большаков [24] установил, что в двухчленных наносах Среднерусской возвышенности во влажные годы в двухметровом слое максимальное количество подперто-подвешенной влаги в среднем на 70—100 мм превышает наименьшую влагоемкость этих почв (величину  $HВ_1$ ). Большаков определял наименьшую влагоемкость  $HВ_2$  верхнего наноса по данным влажности почвы весной в сильно влажные годы.



Обе характеристики почв можно определить и экспериментальным путем. Первая константа — собственно наименьшая влагоемкость верхнего наноса  $HВ_1$  — определяется путем залива площадки

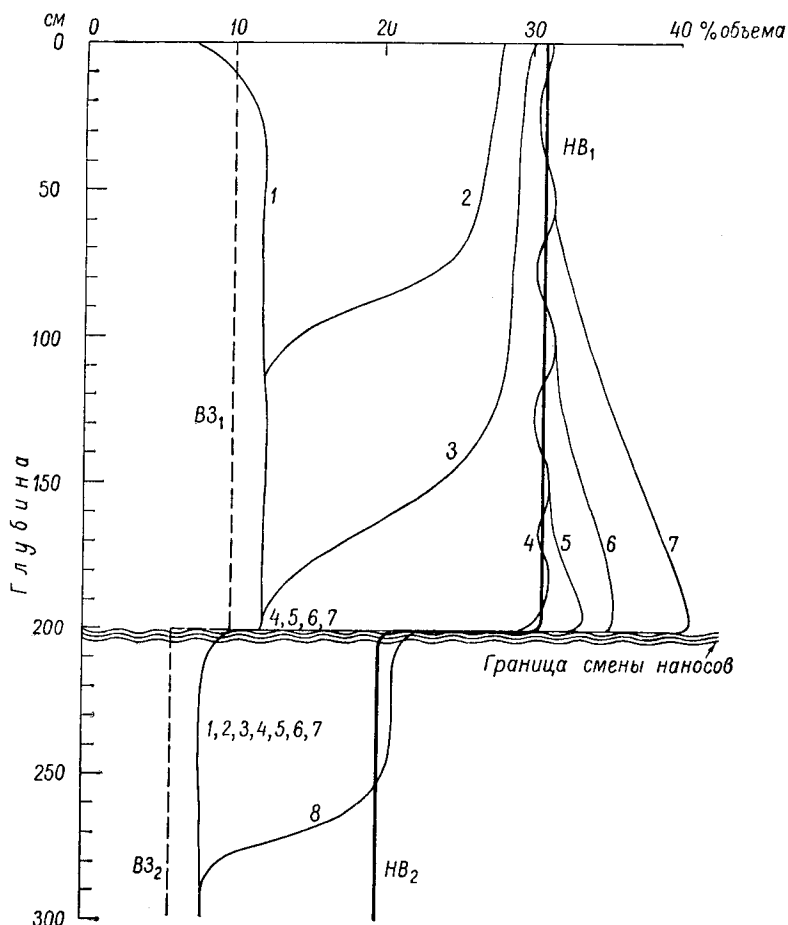


Рис. 10. Схема распределения влаги в почве, развитой на двухчленном наносе, при условии, что верхний нанос тяжелее нижнего по механическому составу [193].

$B3_1$  и  $B3_2$  — кривые влажности, соответствующие влажности завядания верхнего и нижнего наносов,  $HВ_1$  и  $HВ_2$  — кривые влажности, соответствующие наименьшей влагоемкости.

1 — исходная влажность, 2, 3, 4 — распределение влажности при прогрессивном промачивании верхнего наноса вплоть до установления во всей его толще влажности, соответствующей  $HВ_1$ , 5, 6, 7 — кривые влажности, устанавливающиеся в процессе накопления подперто-подвешенной влаги, вплоть до максимально возможного ее содержания (кривая 7), 8 — распределение влажности после начала промачивания нижнего наноса.

таким количеством воды, которое могло бы промочить почву на глубину, несколько меньшую, чем залегание второго наноса, т. е. чтобы не образовалась капиллярно-подпертая вода. Для определе-

ния второй величины  $HВ_2$  площадка заливается таким количеством воды, которое обеспечило бы просачивание ее во второй нанос.

Процессы перераспределения воды после инфильтрации еще не получили математического описания. Поэтому пока трудно определить величину наименьшей влагоемкости по свойствам почвы и данным лабораторных измерений.

**Влажность разрыва капилляров.** В связи с работами Почвенного института им В. В. Докучаева [3, 22, 186, 192] в настоящее время для тонкозернистых почв и грунтов представилось возможным выделить еще один предел увлажнения, при котором подвижность влаги резко меняется, — влажность разрыва капилляров. Автор этого термина М. М. Абрамова характеризует эту константу как влажность, при которой прекращается поднятие воды к месту испарения [3].

Как следует из самого термина, при влажности разрыва капилляров сплошность заполненных влагой пор нарушается, влага резко теряет свою подвижность и уже не может в заметных количествах перемещаться в зону потребления. А. А. Роде считает, что влажность разрыва капилляров, выраженная в процентах веса абсолютно сухой почвы, составляет примерно 70—80%  $HВ$  данной почвы и является величиной постоянной, зависящей главным образом от механического, агрегатного состава и от сложения почвы. До сих пор нет надежных и общедоступных методов определения этой весьма важной в агрономическом отношении константы. Определение влажности в момент прекращения испарения требует сложных, трудоемких и длительных исследований скорости испарения. Поэтому в настоящее время данных о влажности разрыва капилляров крайне недостаточно. Анализ этих данных показывает неустойчивость их соотношений с наименьшей влагоемкостью почв. Так, по материалам, заимствованным из монографии А. А. Роде [192, 193], влажность разрыва капилляров (ВРК), выраженная в процентах сухой почвы, в отдельных экспериментах составляет от 57 до 89%  $HВ$ .

Такая неустойчивость соотношения практически исключает возможность расчета ВРК по наименьшей влагоемкости, надежные данные о величине которой имеются для большинства почв земледельческой зоны СССР.

Из названия этой константы следует, что ВРК — это влажность, при которой механизм движения почвенной влаги в закрытых капиллярах сменяется механизмом движения в открытых капиллярах (по пленкам, покрывающим поверхность элементарных частиц и агрегатов). Поскольку  $HВ$  соответствует влагосодержанию почвы в момент вступления мениска в самую широкую часть поры, а ВРК — влагосодержанию почвы в момент освобождения поры, т. е. в момент вступления мениска в самую узкую часть поры, то количество капиллярной воды в почве при  $HВ$  и ВРК будет определяться радиусом самой широкой и самой узкой части поры.

Анализ показал [91], что радиусы вписанных окружностей в самой узкой и самой широкой частях пор идеальной почвы

соответственно равны  $0,155r$  и  $0,288r$ , т. е. соотношение  $\frac{0,155r}{0,288r} = 0,54$  (здесь  $r$  — радиус шаров, слагающих идеальную почву). Отсюда следует, что при уменьшении влажности соотношение количества капиллярной воды в этих условиях при ВРК и НВ будет практически таким же, около 0,54. Содержание других категорий воды (связанной) в том и другом случаях остается одно и то же.

Диапазон влаги, подчиняющейся менисковым силам, практически соответствует диапазону продуктивной влаги, поскольку НВ отсекает влагу, подчиняющуюся силе тяжести, а влажность устойчивого завядания — связанную воду, для которой роль менисковых сил ничтожна. Вклад последней категории влаги в общее влагосодержание почвы весьма различен для разных почв и составляет от 1 до 20% веса сухой почвы (см. табл. 5).

Исходя из вышеизложенных представлений о явлении разрыва капилляров, агрогидрологи гидрометеорологической службы в практической работе и исследованиях выражают ВРК в миллиметрах продуктивной влаги и принимают ее равной 55% НВ. По таким расчетам ВРК составляет для преобладающего большинства суглинистых почв  $\approx 100$  мм, легких суглинков  $\approx 85$  мм, супесей  $\approx 65$  мм продуктивной влаги в метровом слое почвы.

Конечно, в условиях естественных почв в силу их полидисперсности различия в формах слагающих частиц и степени их агрегации эти представления могут оказаться далекими от реальности. Однако и в этом случае, как и во всех других, когда приходится пользоваться математической моделью идеальной почвы, они могут внести некоторую ясность в понимание сущности явления и дать хотя бы самые грубые придержки при его оценке.

В принципе для различных почв ВРК могло бы определяться по потенциалу почвенной влаги или другим подобным энергетическим показателям на убывающей ветви гистерезисной петли, но по техническим причинам это еще пока практически невыполнимо.

### Потенциал почвенной влаги

В начале девятисотых годов была сделана попытка измерить равнозначные по свойствам количества воды на основе сил, обуславливающих ее передвижение. Было введено понятие о капиллярном потенциале [295].

**Капиллярный потенциал.** Автором этого предложения движущая сила потока рассматривалась как разность натяжений воды неодинаково увлажненных частиц почвы. Было предложено называть эту силу капиллярным потенциалом и выражать в единицах давления (в сантиметрах водяного столба) или в единицах работы (в эргах). В последнем случае капиллярный потенциал рассматривался как работа, необходимая для того, чтобы в почвенной колонне передвинуть единицу массы воды от свободной водной поверхности до данной точки, находящейся над этой поверхностью,

или как работа, способная отнять единицу массы воды от единицы массы почвы при данной ее влажности.

Учение о капиллярном потенциале получило широкое развитие в исследованиях термодинамических условий состояния, передвижения и освоения почвенной влаги растениями (глава II).

В 30-х годах Скофилд [315, 316, 317] в целях уточнения терминологии и упрощения использования капиллярного потенциала предложил обозначать его общепринятым для любой силы символом  $F$  и выражать его логарифмом силы  $pF$ . Введение логарифмической шкалы позволяет для всего диапазона влажности почвы величину  $pF$  представлять одной кривой и одни и те же агрогидрологические константы различных почв выражать одной и той же величиной  $pF$ .

Однако до настоящего времени нет методов, позволяющих определять потенциал почвенной влаги непосредственно в поле при любом увлажнении почвы. Единственным прибором, позволяющим в полевых условиях измерять капиллярное натяжение влаги, является тензиометр, но диапазон его работы очень узок, в пределах всего лишь от 0 до  $-1$  атм, т. е. только для высокой влажности почвы.

Все остальные методы позволяют определять потенциал почвенной влаги лишь в лабораторных условиях на насыпных образцах почвы, доведенных до заданной влажности. Для этого приходится использовать несколько методов, поскольку каждый из них дает надежные результаты лишь в определенном пределе влажности почвы. Краткое описание наиболее часто применяемых в настоящее время методов определения потенциала почвенной влаги дано в главе II.

Совокупность этих методов позволяет рассчитывать потенциал влаги в почве при любых ее влажностях, начиная от полного насыщения, когда он равен нулю, и кончая почти совершенно сухой почвой, когда он приближается к  $-100\,000$  атм, и строить влажностные кривые, т. е. кривые связи между потенциалом почвенной влаги и влажностью почвы для всего диапазона увлажнения исследуемой почвы. Приводимые исследователями кривые зависимости потенциала почвенной влаги от влажности почвы обычно являются десорбционной ветвью гистерезисной петли, поскольку потенциал, как правило, определяется в процессе расхода почвенной влаги. На основании таких кривых [267] было установлено, что у всех почв максимальная гигроскопичность соответствует  $pF \approx 4,8$ , влажность устойчивого завядания  $pF \approx 4,2$ , наименьшая влагоемкость  $pF \approx 2,7$ , капиллярная влагоемкость вблизи нижней границы капиллярной каймы  $pF \approx 0$ . Было установлено также, что понижение точки замерзания воды увязывается с  $pF$  уравнением [316]

$$pF = 4,1 + \lg t, \quad (37)$$

где  $t$  — температура замерзания воды в почве.

Пример взаимосвязи и агрогидрологических констант с величинами  $pF$ , определяемыми различными методами, для трех

различных по механическому составу почв представлен на рис. 11 [267].

Из всего вышеизложенного следует, что влажность, выраженная в процентах веса абсолютно сухой почвы, не может характеризовать условия водоснабжения растений, поскольку при одном и том же содержании влаги ее подвижность и доступность для растений

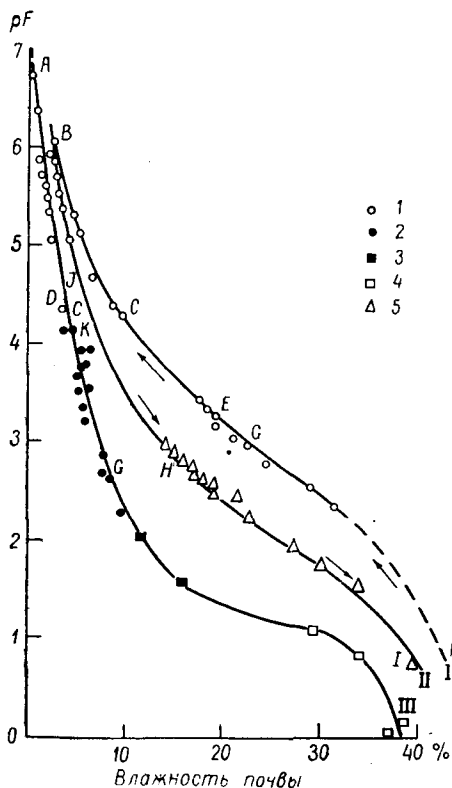


Рис. 11.  $pF$  почвенной влаги [267].

*I, II* — Гринвильская глина, *III* — Диккенсонский мелкий песок; данные: *1* — упругости пара, *2* — центрифугирования, *3* — автоматического увлажнения, *4* — колонки кварцевого песка, *5* — полевых тензиометров; *A* — абсолютно сухая почва при термостатной сушке, *B* — при относительной влажности воздуха 50%, *C* — влажность устойчивого завядания, *D* — гигроскопический коэффициент, *E* — полевая влагоемкость (приближенная), *F* — максимальная влажность (Hilgard'a), *G* — эквивалент влажности (8 мм 1000 g), *H* — при сосущей силе 0,5 атм, *I* — при сосущей силе пятисантиметрового столба воды, *J* — гигроскопичность над 10-процентной серной кислотой, *K* — гигроскопичность над 3,3-процентной серной кислотой.

у разных почв весьма различна. Так, на рис. 11 видно, что, например, влажность 8% для одной почвы (мелкий песок) — это величина, близкая к наименьшей влагоемкости ( $pF=2,8$ ), т. е. к оптимальным условиям водоснабжения, для другой почвы (глина) эта величина соответствует влажности, даже меньшей коэффициента завядания ( $pF=4,4$ ), т. е. влажности, при которой прекращается рост растения, а следовательно, и формирование урожая. Поэтому характеристика условий водоснабжения растений на больших географических пространствах с разнообразными почвами может быть дана на основе сравнения количества воды, одинаковой по физическим свойствам и доступности для растений. Это можно осуществить, пользуясь лишь данными об агрогидрологических свойствах почв, их агрогидрологических константах.

В Гидрометслужбе СССР такой подход был осуществлен уже более 30 лет тому назад по инициативе С. А. Вериго. Было предложено наряду с организацией массовых сетевых наблюдений над влажностью почв обеспечить определение их агрогидрологических констант, что практически осуществляется в настоящее время.

Основной целью их определения является получение данных, обеспечивающих возможность расчета абсолютных количеств доступной для растений влаги. Эти константы определяются для той же почвы, влажность которой изучается на репрезентативных для данной почвы участках.

При решении вопроса о репрезентативности учитывается, что для любой почвы, даже кажущейся на первый взгляд вполне однородной, при более детальном рассмотрении обнаруживается микрокомплексность, т. е. систематическая изменчивость в пределах очень небольших пространств (порядка 20—50 см), а следовательно, и некоторая неоднородность агрогидрологических констант. Для большинства почв эта микрокомплексная неоднородность невелика: различия как влажности устойчивого завядания, так и наименьшей влагоемкости обычно не превышают 1—2% влажности почвы. Для большей части территории практически невозможно и нецелесообразно при выборе репрезентативного участка ориентироваться на константы отдельных элементов этого микрокомплекса. Используемые константы должны отражать соответствие их всему микрокомплексу наблюдательного участка в целом. Эти же агрогидрологические константы могут быть использованы и для других наблюдательных участков, где определяется влажность почвы, если их почвы относятся к тому же типу и к тому же микрокомплексу. В тех случаях, когда почвы отдельных наблюдательных участков принадлежат одному типу, но не могут быть отнесены к одному микрокомплексу, следует определять константы для каждого из них.

В некоторых районах, характеризующихся наличием комплексных и мозаичных почв, где в пределах одного наблюдательного участка могут встречаться пятна глины и песка, песка и торфа (крайние северные районы) или пятна незасоленных почв и солонцов (крайние юго-восточные районы Европейской территории СССР), агрогидрологические константы должны определяться для каждого элемента комплекса обязательно.

Ввиду того что агрогидрологические свойства почв сильно меняются с глубиной, а целью исследования водного режима является характеристика всего корнеобитаемого слоя, агрогидрологические константы почвы определяются для всех глубин, на которых берутся пробы на влажность, т. е. для каждого 10-сантиметрового слоя.

В отношении репрезентативности агрогидрологических свойств во времени вопрос более прост. Многие агрогидрологические свойства минеральных почв, характеризующие водоудерживающую способность, во времени изменяются очень медленно. Поэтому их можно определять один раз в 20—40 лет. Что касается органических почв, то с окультуриванием их водные свойства изменяются

**Свойства почвенной влаги, их значение для**

Категория почвенной влаги	Свойства			
	напряжение		температура замерзания, °C	подвижность
	атм.	$pF$		
Связанная				
прочносвязанная	Меньше —50	Больше 4,8	Ниже —4,0	Неподвижна
рыхлосвязанная	—50, —10	4,8—4,2	—4,0, —1,5	Практически не- подвижна
Капиллярная				
открытых капил- ляров . . . . .	—50, —0,5	4,8—2,7	—1,5, —0,1	Слабоподвижна, у нижнего предела практически не- подвижна
закрытых капил- ляров . . . . .	—0,5, —0,0	меньше 2,7	—0,1, 0,0	Легкоподвижна
Гравитационная грун- тового потока . . . .	0,0	—	0,0	Легкоподвижна

## растений и физико-механического состояния почвы

почвенной влаги		Состояние почвы		
доступность для растений	Характер увлажнения	талой	мерзлой	характер почвенной мерзлоты
Недоступна	Ниже максимальной гигроскопичности	Твердая и сыпучая	Кристаллы льда отсутствуют	Почва рассыпается при легком прикосновении
Практически недоступна	Максимальная гигроскопичность — влажность устойчивого завядания	Твердопластичная	Кристаллы видны лишь через лупу в небольшом количестве вблизи корешков	Почва крошится при резании ножом и надавливании
Доступна	Влажность устойчивого завядания — наименьшая влагоемкость	Мягкопластичная	При нижнем пределе мелкие кристаллы льда видны через лупу, при верхнем пределе кристаллы льда видны невооруженным глазом	Почва с трудом режется ножом
Легкодоступна	Наименьшая влагоемкость — максимальная капиллярная влагоемкость	Липкопластичная	При разломах на стенках раковин видны скопления крупных кристаллов льда	Почва с трудом распиливается пилой
Легкодоступна, временами избыточна	Выше максимальной капиллярной влагоемкости	Текучая	Имеется большое количество горизонтальных прослоек льда монолитной структуры	Почва с очень большим усилием распиливается пилой



быстро. Поэтому в первое время после окультуривания их требуется определять через 1—2 года.

Описанный выше методологический подход к изучению режима влажности почв (определение не только динамики влажности, но и агрогидрологических свойств) позволил уже более 20 лет назад [31, 32] дать характеристику запасов почвенной влаги и влагообеспеченности зерновых культур на территории Советского Союза, несмотря на огромную пространственную неоднородность почв и климата, притом представить их как в миллиметрах продуктивной влаги, так и в потенциалах почвенной влаги  $pF$ .

Потенциалы почвенной влаги рассчитывались по кривым связи влагосодержание почвы — потенциал [267]. Эта связь на отрезках кривой между влажностью устойчивого завядания и наименьшей влагоемкостью, т. е. в диапазоне продуктивной влаги, считалась прямолинейной. Влажность устойчивого завядания принималась соответствующей потенциалу,  $\approx -15$  атм и  $pF \approx 4,2$ , наименьшая влагоемкость — потенциалу  $\approx -0,5$  атм и  $pF \approx 2,7$ . В строго математическом смысле такие допущения, может быть, не всегда достаточно точны. Однако в практических целях они вполне приемлемы, поскольку возможные ошибки таких расчетов в обычных условиях находятся в пределах точности определения влагозапасов и потенциалов почвенной влаги. Допустимость таких расчетов в настоящее время подтверждается работами И. И. Судницына [214], А. М. Глобуса [48] и др.

Характеристика свойств почвенной влаги и значение их для растений и физико-механического состояния талой и мерзлой почвы, которыми авторы данной книги пользовались при расчетах, анализе и использовании материалов наблюдений над водным режимом почв в сельскохозяйственных целях, в обобщенном виде представлены в табл. 7.

## Глава V

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Почвенная влага — один из основных факторов произрастания сельскохозяйственных культур и условий проведения полевых работ. Количество ее в почве непрерывно меняется во времени и пространстве. Поэтому требуется систематический учет влажности почвы в полевых условиях.

Содержание влаги в почве принято выражать или в процентах веса сухой почвы, или в процентах ее объема или же в миллиметрах толщины водного слоя.

В целях оценки условий произрастания и формирования урожая сельскохозяйственных культур учет влажности почвы должен производиться в течение всего вегетационного периода. Наблюдения приходится вести во всем корнеобитаемом слое дифференцированно по глубине, так как ввиду ограниченной подвижности почвенной влаги могут создаваться существенные различия во влажности почвы по ее вертикальному профилю. Вследствие этого определения влажности почвы носят характер массовых полевых измерений. Этим и обуславливается принципиальный подход к методам наблюдений над влажностью почвы.

Разработка методов определения влажности почвы, ввиду большой ее значимости, издавна привлекала внимание исследователей. За последнее столетие благодаря развитию научной агрономии и физических наук было предложено много методов, но лишь немногие из них оказались пригодными или перспективными для применения в полевых условиях.

Имеются прямые и косвенные методы полевых определений влажности почвы. Прямыми методами непосредственно измеряется количество имеющейся в почве воды. Косвенными методами влажность почвы учитывается путем определения изменений тех или иных физических свойств почвы, зависящих от степени ее увлажнения.

#### Прямой метод определения влажности почвы

Прямым, наиболее старым, ставшим уже классическим методом полевых определений влажности почвы является метод сушки образцов почвы. Он принят в качестве эталона для оценки

применимости других методов. В его основу положено определение количества воды, имеющейся в почве, путем высушивания образцов, вынутых из почвы. Этот метод предусматривает измерение всего количества содержащейся в почве воды — суммы почвенной влаги всех категорий. Поскольку при этом необходимо отделить от почвы и связанную воду, высушивание образцов производится при температуре 100—105° С и продолжается до достижения постоянного веса. Количество воды в данном образце определяется как разность в весе исследуемого образца до и после высушивания. Для выемки образцов почвы применяются буры.

В настоящее время на сети станций Гидрометслужбы СССР определение влажности почвы методом сушки [148] производится следующим образом. Для выемки образцов принят бур АМ-16, позволяющий брать пробы как талой, так и мерзлой почвы (рис. 12). Принцип действия этого бора основан на ручном вращении бурового стакана с помощью штанги и ручки-воротка. Благодаря спиралеобразным режущим краям буровой стакан при вращении заглубляется и заполняется почвой. Пробы на влажность почвы из каждой скважины берутся в сушильные стаканчики последовательно через каждые 10 см на всю заданную глубину.

После взятия каждой пробы по установленной форме производится запись номера стаканчика, в который она помещена, и глубины слоя почвы, с которой она вынута. Одновременно отмечаются особенности взятой пробы: наличие в ней мелких камешков, прослоек песка или глины, кристаллов льда и других включений, а также указывается, чем отличается данная проба от смежных по увлажнению, цвету и др. Для этого просматривается почва, оставшаяся в буре после выемки из него почвенной пробы.

В холодную часть года при выемке образцов почвы для определения ее влажности следует учитывать мерзлоту в почве. Наличие и характер мерзлоты определяются путем резания почвы ножом, излома и сжатия ее рукой и просмотром через лупу или невооруженным глазом.

Сильно промерзшая, сцементированная льдом почва совершенно не режется ножом, при изломе и сжатии в руке остается в неизменно твердом виде; в такой почве хорошо видны кристаллы, прослойки или линзы льда (обозначается значком м<sup>3</sup>). Умеренно промерзшая почва не поддается излому и сжатию рукой, но, хотя и с трудом, режется ножом; в ней хорошо видны невооруженным глазом кристаллы льда (обозначается значком м<sup>2</sup>).

Слабо промерзшая влажная почва легко режется ножом и поддается сжатию в руке, в ней видны невооруженным глазом кристаллы льда (обозначается значком м<sup>1</sup>).

Сухая промерзшая почва крошится и рассыпается при резании и сжатии рукой, очень легко берется буром, имеет видные лишь через лупу очень мелкие кристаллы льда (обозначается значком м<sup>0</sup>).

После доставки в лабораторию пробы взвешиваются на технических весах с точностью до 0,05 г. Результаты взвешивания запи-

сываются в ту же таблицу, в которой производились записи в поле. Сушка проб производится в термостатах или в сушильных шкафах до постоянного веса при температуре  $100-105^{\circ}\text{C}$ . На основании полученных данных по разности веса образца до и после высуши-

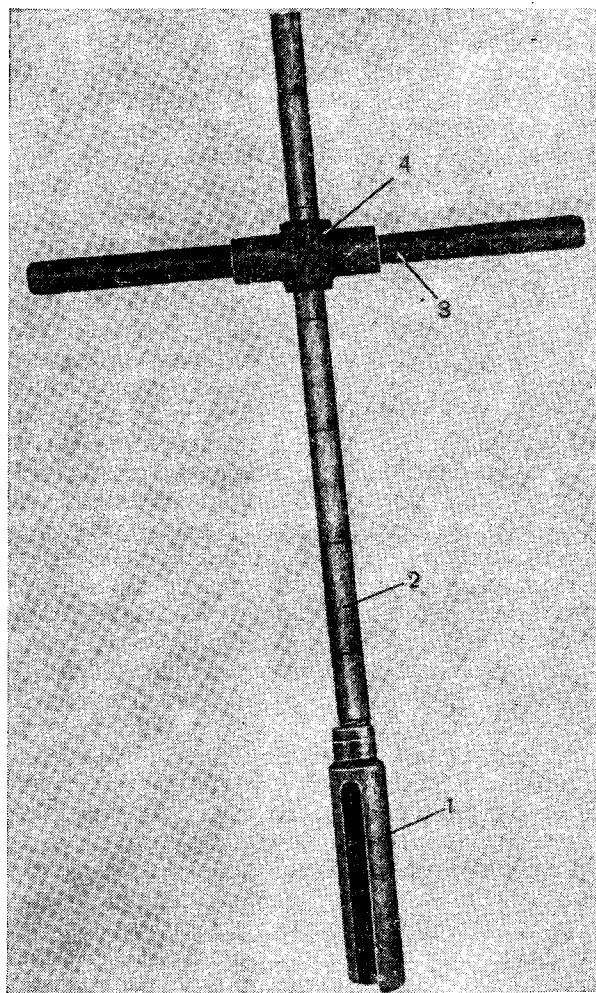


Рис. 12. Почвенный бур АМ-16 в собранном виде.

1 — буровой стакан, 2 — штанга, 3 — вороток, 4 — фиксатор.

вания вычисляется влажность в процентах веса абсолютно сухой почвы.

Наблюдения над влажностью почвы производятся на постоянных наблюдательных участках размером 1 га, выделенных на всех полях ведущего севооборота и на основных сельскохозяйственных

угодьях — лугах, пастбищах, плодовых насаждениях и др. Для того чтобы результаты наблюдений над влажностью почвы под какой-либо культурой были сравнимы от года к году, необходимо, чтобы выбранные наблюдательные участки были однотипными по факторам, наиболее сильно влияющими на динамику влажности: по почвенному покрову, глубине залегания грунтовых вод, рельефу, характеру агротехники и др. Под однотипностью не следует понимать абсолютное совпадение всех местных условий. Однотипными надо считать такие участки, которые в отношении факторов, определяющих водный режим почв, существенно не различаются.

По механическому составу почв различают три типа участков: а) с супесчаными и песчаными почвами, отличающимися малой влагоемкостью, большой водопроницаемостью и скоростью расходования влаги, а также быстрым промерзанием и оттаиванием; б) с тяжелыми суглинистыми и глинистыми почвами, характеризующимися слабой водопроницаемостью, сильной цементацией при высыхании и замедленным промерзанием и оттаиванием; в) с легкосуглинистыми и среднесуглинистыми почвами, водные и тепловые свойства которых занимают промежуточное положение.

По генезису почв однотипными считаются участки, характеризующиеся: а) черноземными высокоструктурными почвами с благоприятным для растений водным и тепловым режимом; б) нечерноземными бесструктурными и слабоструктурными почвами, с менее благоприятными водными и тепловыми свойствами; в) торфяными (органическими) почвами с исключительно большой влагоемкостью и крайне замедленными процессами промерзания и оттаивания.

В качестве критериев однотипности наблюдательных участков можно пользоваться показаниями влажности устойчивого завядания и максимальной гигроскопичности. Однотипными следует считать участки, почва которых по этим показателям отличается не более чем на 1—2% веса абсолютно сухой навески.

По глубине залегания грунтовых вод и верховодок однотипными могут считаться участки: а) с глубиной залегания грунтовых вод и верховодок в течение всего года на суглинистых почвах больше 5 м и на песчаных больше 3 м; грунтовые воды не влияют на режим влажности и промерзания почвы; б) с грунтовыми водами и верховодками хотя бы в отдельные периоды года, поднимающимися на суглинистых почвах до глубины меньше 2 м и на супесчаных — меньше 0,5 м от поверхности, что обуславливает обводнение почв; в) с глубиной залегания грунтовых вод и верховодок на суглинистых почвах от 2 до 3 м и на супесчаных от 0,5 до 3 м, где воздействие их проявляется лишь в отдельные периоды года.

Участки с однотипным рельефом располагаются в одинаковых условиях: на ровном месте или на склонах с одинаковой ориентацией и крутизной. В зависимости от расположения наблюдательных участков относительно лесных опушек и полос также можно выделить однотипные участки. Критерием однотипности в этом случае может служить удаление наблюдательных участков от лес-

ных опушек и полос: участки, расположенные на расстоянии больше двадцатикратной высоты леса или лесной полосы, можно считать находящимися вне их воздействия, меньше — под воздействием.

Однотипными в агротехническом отношении считаются участки, на которых применяется основная агротехника, принятая в хозяйстве (например сев по зяби, по чистому пару, по лущеной стерне и др.).

При выборе наблюдательного участка следует руководствоваться совокупностью признаков однотипности. На каждом наблюдательном участке влажность почвы определяется не менее чем в четырехкратной повторности. Скважины располагаются с таким расчетом, чтобы средняя из повторностей наилучшим образом отражала влажность всего наблюдательного участка. Для этого необходимо придерживаться заранее установленной схемы расположения скважин и смещения их от срока к сроку и от года к году. В неорошаемых условиях схемой расположения скважин предусматривается учет естественной пестроты распределения влажности почвы на данном поле. При орошении и осушении, кроме того, учитывается и пестрота распределения влажности почвы, обуславливаемая техникой поливов и осушения. Например, если полив производится напуском, то скважины располагаются с учетом места впуска воды. При осушении же учитывается местонахождение дренажа. При полезащитном лесоразведении скважины следует располагать с учетом ширины междоузлия поля и высоты лесонасаждений.

Наблюдения должны производиться систематически в течение всего вегетационного периода. Ввиду трудоемкости метода в неорошаемых условиях определение влажности почвы принято производить один раз в декаду с таким расчетом, чтобы результаты этих определений попадали в оперативные сводки (декадные бюллетени). В орошаемых условиях сроки определения влажности почвы должны обеспечивать возможность расчета сроков и норм полива.

Метод сушки образцов почвы прост и надежен, но ему присущи и крупные недостатки: 1) нет непрерывности в наблюдениях над изменением влажности почвы, так как каждый раз образцы берутся из новой скважины; 2) определяется влажность небольшого образца почвы, а результаты этого определения должны распространяться на целые участки, поэтому в связи с пестротой распределения влажности почвы необходимо иметь достаточное количество повторных выемок образцов (буровых скважин); 3) процесс выемки образцов громоздок и трудоемок, поэтому повторность и сроки наблюдений могут быть заданы лишь весьма ограниченными; 4) результаты определений становятся известными не сразу, а только после высушивания образцов.

Особенно важное значение имеет пункт 2, поскольку недостаточное число повторностей снижает надежность и тем самым иногда сильно обесценивает полученные результаты. В силу

угодьях — лугах, пастбищах, плодовых насаждениях и др. Для того чтобы результаты наблюдений над влажностью почвы под какой-либо культурой были сравнимы от года к году, необходимо, чтобы выбранные наблюдательные участки были однотипными по факторам, наиболее сильно влияющими на динамику влажности: по почвенному покрову, глубине залегания грунтовых вод, рельефу, характеру агротехники и др. Под однотипностью не следует понимать абсолютное совпадение всех местных условий. Однотипными надо считать такие участки, которые в отношении факторов, определяющих водный режим почв, существенно не различаются.

По механическому составу почв различают три типа участков: а) с супесчаными и песчаными почвами, отличающимися малой влагоемкостью, большой водопроницаемостью и скоростью расхождения влаги, а также быстрым промерзанием и оттаиванием; б) с тяжелыми суглинистыми и глинистыми почвами, характеризующимися слабой водопроницаемостью, сильной цементацией при высыхании и замедленным промерзанием и оттаиванием; в) с легкосуглинистыми и среднесуглинистыми почвами, водные и тепловые свойства которых занимают промежуточное положение.

По генезису почв однотипными считаются участки, характеризующиеся: а) черноземными высокоструктурными почвами с благоприятным для растений водным и тепловым режимом; б) нечерноземными бесструктурными и слабоструктурными почвами, с менее благоприятными водными и тепловыми свойствами; в) торфяными (органическими) почвами с исключительно большой влагоемкостью и крайне замедленными процессами промерзания и оттаивания.

В качестве критериев однотипности наблюдательных участков можно пользоваться показаниями влажности устойчивого завядания и максимальной гигроскопичности. Однотипными следует считать участки, почва которых по этим показателям отличается не более чем на 1—2% веса абсолютно сухой навески.

По глубине залегания грунтовых вод и верховодок однотипными могут считаться участки: а) с глубиной залегания грунтовых вод и верховодок в течение всего года на суглинистых почвах больше 5 м и на песчаных больше 3 м; грунтовые воды не влияют на режим влажности и промерзания почвы; б) с грунтовыми водами и верховодками хотя бы в отдельные периоды года, поднимающимися на суглинистых почвах до глубины меньше 2 м и на супесчаных — меньше 0,5 м от поверхности, что обуславливает обводнение почв; в) с глубиной залегания грунтовых вод и верховодок на суглинистых почвах от 2 до 3 м и на супесчаных от 0,5 до 3 м, где воздействие их проявляется лишь в отдельные периоды года.

Участки с однотипным рельефом располагаются в одинаковых условиях: на ровном месте или на склонах с одинаковой ориентацией и крутизной. В зависимости от расположения наблюдательных участков относительно лесных опушек и полос также можно выделить однотипные участки. Критерием однотипности в этом случае может служить удаление наблюдательных участков от лес-

ных опушек и полос: участки, расположенные на расстоянии больше двадцатикратной высоты леса или лесной полосы, можно считать находящимися вне их воздействия, меньше — под воздействием:

Однотипными в агротехническом отношении считаются участки, на которых применяется основная агротехника, принятая в хозяйстве (например сев по зяби, по чистому пару, по лущеной стерне и др.).

При выборе наблюдательного участка следует руководствоваться совокупностью признаков однотипности. На каждом наблюдательном участке влажность почвы определяется не менее чем в четырехкратной повторности. Скважины располагаются с таким расчетом, чтобы средняя из повторностей наилучшим образом отражала влажность всего наблюдательного участка. Для этого необходимо придерживаться заранее установленной схемы расположения скважин и смещения их от срока к сроку и от года к году. В неорошаемых условиях схемой расположения скважин предусматривается учет естественной пестроты распределения влажности почвы на данном поле. При орошении и осушении, кроме того, учитывается и пестрота распределения влажности почвы, обуславливаемая техникой поливов и осушения. Например, если полив производится напуском, то скважины располагаются с учетом места впуска воды. При осушении же учитывается местонахождение дренажа. При полезащитном лесоразведении скважины следует располагать с учетом ширины межполосного поля и высоты лесонасаждений.

Наблюдения должны производиться систематически в течение всего вегетационного периода. Ввиду трудоемкости метода в неорошаемых условиях определение влажности почвы принято производить один раз в декаду с таким расчетом, чтобы результаты этих определений попадали в оперативные сводки (декадные бюллетени). В орошаемых условиях сроки определения влажности почвы должны обеспечивать возможность расчета сроков и норм полива.

Метод сушки образцов почвы прост и надежен, но ему присущи и крупные недостатки: 1) нет непрерывности в наблюдениях над изменением влажности почвы, так как каждый раз образцы берутся из новой скважины; 2) определяется влажность небольшого образца почвы, а результаты этого определения должны распространяться на целые участки, поэтому в связи с пестротой распределения влажности почвы необходимо иметь достаточное количество повторных выемок образцов (буровых скважин); 3) процесс выемки образцов громоздок и трудоемок, поэтому повторность и сроки наблюдений могут быть заданы лишь весьма ограниченные; 4) результаты определений становятся известными не сразу, а только после высушивания образцов.

Особенно важное значение имеет пункт 2, поскольку недостаточное число повторностей снижает надежность и тем самым иногда сильно обесценивает полученные результаты. В силу



пространственной изменчивости, обусловливаемой неоднородностью почвы, рельефа, состояния культуры, агротехники и др., влажность почвы отдельных скважин всегда в той или иной мере различается и может быть охарактеризована лишь средними данными из нескольких скважин.

Р. Слейтер и И. Макилрой [210] в качестве примера влияния пестроты почвы на ее влажность приводят данные зависимости между влажностью почвы и количеством содержащейся в ней глины при постоянном натяжении почвенной влаги  $pF$ , т. е. в нашем понимании при равнозначной в сельскохозяйственном отношении влажности (рис. 13). Пробы брались под однородным растительным покровом в точках, расположенных на расстоянии 3 м одна от другой. По этим данным, в зависимости от одного фактора — количества глины, содержащейся в образцах, влажность, выраженная в процентах веса абсолютно сухой почвы, различалась при высокой влажности, близкой к наименьшей влагоемкости ( $pF \approx 2,9$ ), в пределах 10%; при низкой влажности, близкой к влажности завядания ( $pF \approx 4,8$ ), в пределах 5%.

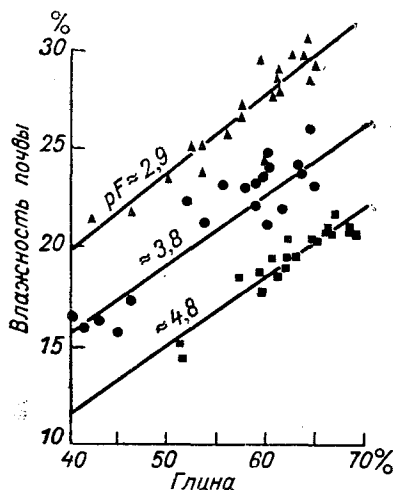


Рис. 13. Зависимость между влажностью почвы и количеством содержащейся в ней глины при постоянном натяжении почвенной влаги (по Эйтчисону, Батледу и Герру).

По результатам их подсчетов, необходимое число проб, обеспечивающее надежность разниц средних величин влажности почвы на 2, 1 и 0,5% при точности их определения, равной 0,05, составляет от 3—5 до 46.

П. А. Некрасов [151] по исследованиям на полях Тимирязевской сельскохозяйственной академии установил, что число необходимых повторностей в зависимости от варьирования влажности почвы  $v$  было равно: при  $v=10\%$  — трем, при  $v=20\%$  — пяти и при  $v=25\%$  — десяти.

На основе систематизации сведений о точности наблюдений над агрометеорологическими элементами на сети станций и постов Гидрометслужбы СССР [146] даются следующие величины погрешностей наблюдений над влажностью почвы при выражении ее в процентах веса абсолютно сухой почвы в богарных условиях: 1) средняя погрешность определения влажности отдельных почвенных проб при вероятности 68% составляет 0,5%, предельная погрешность при вероятности 95% равна 1,0%; 2) средняя погрешность (с вероятностью 60%) определения влажности однотипных по механическому составу суглинистых почв на наблюдательном участке площадью 1 га при четырехкратной повторности колеблется в пределах 0,6—1,5%, предельная (с вероятностью 80%) — 1,0—2,5%.

веса абсолютно сухой почвы (первые величины относятся к участкам с малой изменчивостью влажности, вторые — к участкам с большой изменчивостью).

### Косвенные методы определения влажности почвы

Косвенные методы, считающиеся в настоящее время перспективными и совершенствующися, по принципам, положенным в их основу, могут быть подразделены на три группы, основанные: а) на электросопротивлении (омический метод), б) на капиллярном натяжении почвенной влаги (тензиометрический метод) и в) на способности почвенной влаги ослаблять проходящие через почву гамма-лучи или превращать быстрые нейтроны в медленные (нейтронный).

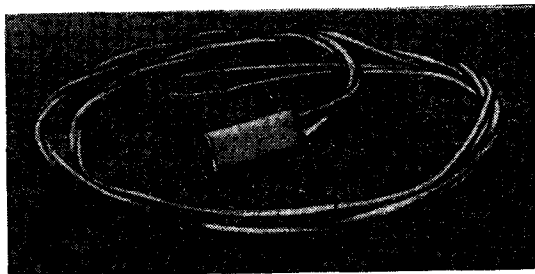


Рис. 14. Датчик влагомера ИВП-53.

Метод измерения влажности почвы по электросопротивлению (омический) основан на возрастании электросопротивления почвы с уменьшением ее влажности. Измерение влажности почвы этим методом сводится к измерению сопротивления между электродами, погруженными в почву либо в промежуточную среду. Диапазон действия этого метода широк: омическим методом можно измерять влажность почвы в пределах от наименьшей влагоемкости до влажности устойчивого завядания и несколько ниже. Метод применим для измерения влажности лишь талых почв, так как при замерзании почв наблюдается резкое увеличение сопротивления.

Создано много приборов для измерения влажности почвы по электросопротивлению [65, 263а—264, 275—284, 286—290, 297, 298, 301, 314, 331]. Одним из них является омический влагомер ИВП-53, сконструированный А. И. Данилиным [56—58]. Почвенный влагомер ИВП-53 состоит из комплекта датчиков (рис. 14) и мегометра. Каждый датчик имеет два угольных электрода, разделенных между собой изоляционными прокладками из эбонита, текстолита или винипласта. Электроды обернуты нитью из стекловолна. Стекловолно имеет громадную удельную поверхность и при тесном соприкосновении с почвой принимает равновесную с ней влажность, поэтому по сопротивлению угольных электродов можно определять электросопротивление соприкасающейся со стекловол-

локном почвы, а тем самым и ее влажность. В поле закладка датчиков в почву производится на все глубины, на которых предполагается измерять влажность почвы. Для установки каждого датчика буром делается скважина до глубины закладки датчика. На дно скважины закладывается предварительно смоченный датчик, который затем засыпается вынутой с этой глубины почвой. Почва слегка утрамбовывается, чтобы обеспечить надежный стык стекловолокну с почвой. Датчики остаются в поле на весь период наблюдений, в том числе и на зиму, хотя отсчеты по ним с момента замерзания почвы прекращаются. Измерение сопротивления производится по мегомметру вращением ручки со скоростью около 120 оборотов в минуту. Отсчет сопротивления должен быть быстрым, не более 5 с. Сопротивление приводится к температуре  $0^{\circ}\text{C}$  по формуле

$$R_0 = R(1 + at), \quad (38)$$

где  $R_0$  — электрическое сопротивление датчика в омах, приведенное к температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $R$  — электрическое сопротивление датчика, измеренное при данной температуре на глубине датчика,  $a$  — температурный коэффициент изменения сопротивления, равный 0,030 на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Тарировка прибора может быть полевой и лабораторной. Полевая тарировка сводится к параллельным измерениям влажности почвы омическим методом и методом сушки образцов с одновременным отсчетом температуры почвы. При тарировке необходимо получить отсчеты при различной влажности почвы, начиная от коэффициента увядания и даже несколько ниже, до ее наименьшей влагоемкости, что обычно составляет не менее 15—20 параллельных определений, охватывающих почти весь вегетационный период. Имея серию параллельных наблюдений, можно построить тарировочный график отдельно для каждого датчика (рис. 15).

Лабораторная тарировка каждого датчика производится на образце почвы, вынутом с той части участка и с той глубины, куда предполагается заложить данный датчик. Учитывая гистерезисные явления, при лабораторной тарировке производится серия параллельных определений влажности и омического сопротивления образца почвы в пределах высыхания его от насыщения до воздушно-сухого состояния. Для этого образец почвы с помещенным в него датчиком и термометром вначале смачивается до водоудерживающей способности почвы, а затем постепенно подсушивается. Отсчеты омического сопротивления с одновременным взвешиванием образца и определением его температуры производятся систематически через определенные промежутки времени. Зная вес абсолютно сухой почвы в образце и вес влажной почвы для каждого измеренного сопротивления датчика, вычисляют влажность почвы в процентах. После введения в омическое сопротивление поправок на температуру по полученным отсчетам строят тарировочную кривую. В лабораторных условиях тарировка может произво-

даться на образцах почвы как с нарушенным, так и с ненарушенным строением. Последние намного предпочтительнее, поскольку они исключают погрешности вследствие нарушения плотности и строения почвы и по своим условиям приближаются к полевой тарировке.

Достоинствами омического метода являются: возможность обеспечить непрерывность наблюдений в одних и тех же точках в те-

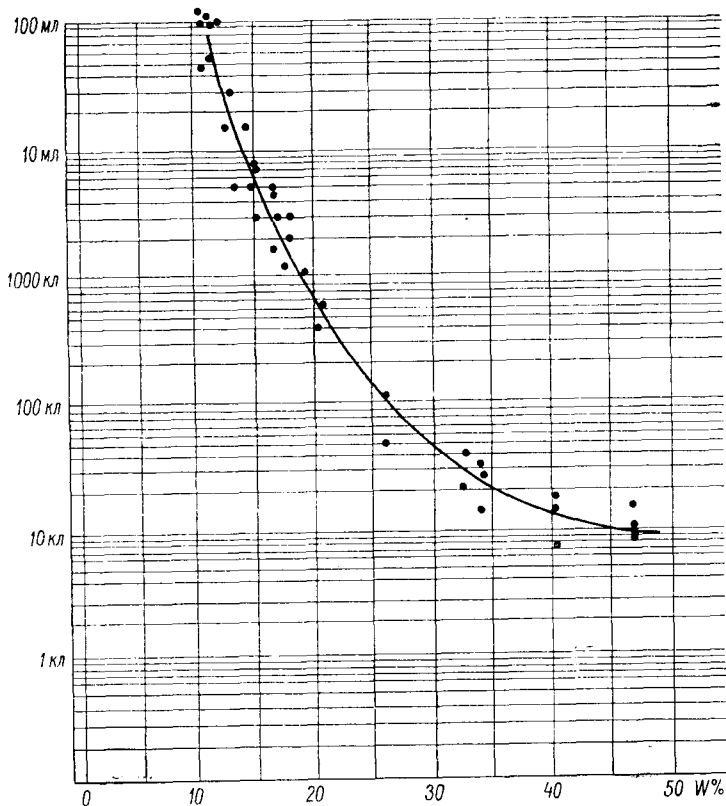


Рис. 15. График тарировки датчика влагомера ИВП-53.

чение всего теплого периода, дистанционность наблюдений, простота и быстрота производства отсчетов, удобство для повторных измерений в одной точке, дешевизна оборудования. Основные недостатки: значительное отставание показаний датчиков от измерений влажности в окружающей почве (около суток); необходимость тарировки для каждого слоя почвы, в котором определяется влажность, и изменение тарировки со временем; необходимость внесения поправок на температуру; зависимость показаний прибора от засоленности и пестроты почвы и невозможность введения количественных поправок на действие этих факторов.

Метод определения влажности почвы по капиллярному натяжению основан на уменьшении величины капиллярного натяжения с уменьшением влажности почвы. Измерение влажности почвы этим методом сводится к измерению вакуума, создающегося в приборе вследствие отсасывания из него воды почвой. Измерения производятся при помощи манометра, герметически соединенного с помещенным в почву наполненным водой тонкопористым сосудом. Приборы этого типа называются гидросорбентами, или тензиометрами (см. главу II).

Имеется много модификаций этого типа приборов и много работ, излагающих способы их применения для измерения влажности и капиллярного натяжения влаги в почве [14, 40—42, 101, 102, 145, 243, 252, 253, 301, 302, 305—310, 311, 312, 318, 319, 324].

Один из таких приборов конструкции Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (система К. Н. Шишкова [252]) представлен на рис. 16. Основной рабочей частью этого прибора является воронкообразный керамический фильтр, обеспечивающий связь между водой, заполняющей прибор, и влагой почвы. Дно фильтра пористое с диаметром пор, не превышающим 1,0—1,5 мк. Боковые стенки фильтра покрыты глазурью и непроницаемы для воды и воздуха. Медная или латунная трубка с внутренним диаметром 8—10 мм служит для установки фильтра в почву на определенную глубину и соединяет фильтр со стеклянным баллоном-воздухоуловителем. Последний служит для заполнения прибора водой и освобождения его от проникшего в прибор воздуха, для чего в верхней части воздухоуловителя имеется закрываемое резиновой пробкой отверстие. Имеющиеся у воздухоуловителя два отростка служат для соединения его с металлической трубкой и с манометром. Манометр представляет собой V-образ-

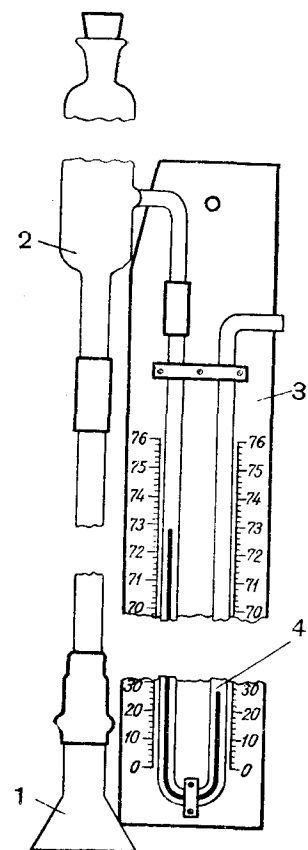


Рис. 16. Тензиометр Шишкова (схема).

1 — керамика, 2 — воздухоуловитель, 3 — манометрическая шкала, 4 — манометр.

ную толстостенную стеклянную трубку высотой 800 мм и внутренним диаметром 1,5 мм, наполненную хорошо очищенной ртутью. Все части прибора герметически соединяются между собой отрезками вакуумоустойчивой резиновой трубки. Керамика, медная трубка, воздухоуловитель и свободная от ртути часть соединенного с воздухоуловителем колена манометрической трубки заполняются водой.

В зависимости от степени увлажнения почвы в соответствии с разностью натяжения в керамике и почве вода передвигается из почвы в прибор или из прибора в почву, что вызывает образование или заполнение вакуума и отмечается изменением давления в приборе.

Диапазон работы этих приборов ограничен. Верхним пределом является капиллярное насыщение почвы, так как в этом случае капиллярное натяжение в почве близко к нулю. Нижним пределом является влажность почвы, соответствующая капиллярному натяжению  $\approx 0,85$  атм, при которой капиллярная вода начинает терять свою сплошность и через керамику начинает проникать воздух.

Капиллярное натяжение для тензиометров, имеющих ртутный манометр, вычисляется по формуле [33]

$$K = 1,36(h_1 - h_2) - 0,1h_1 - H, \quad (39)$$

где  $K$  — капиллярное натяжение (в см водяного столба),  $h_1$  — высота ртути в герметически соединенном с керамикой колене (мм),  $h_2$  — высота ртути в открытом колене манометра (мм), коэффициент 1,36 — плотность ртути, деленная на десять, 0,1 — коэффициент для перевода миллиметров в сантиметры.  $H$  — глубина установки керамики в почву (см).

Полевые наблюдения по приборам этого типа сводятся к отсчету показаний манометра. Тарировка приборов возможна как в полевых, так в лабораторных условиях

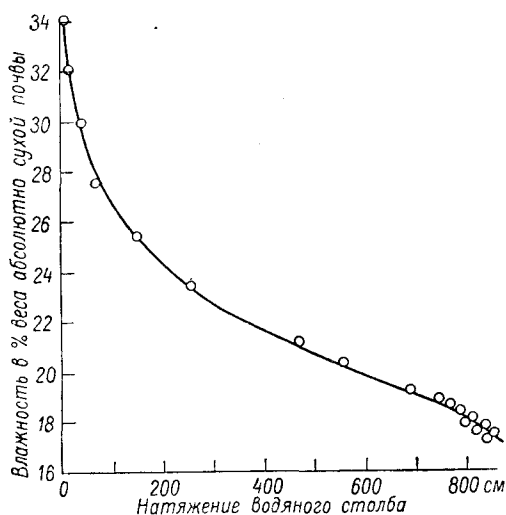


Рис. 17. График тарировки тензиометра.

(рис. 17). Первая значительно предпочтительнее второй. Положительные стороны метода — непрерывность наблюдений в одних и тех же точках, простота отсчетов, быстрая реакция прибора на промачивание почвы. Отрицательными сторонами являются ограниченность учитываемого диапазона влажности и необходимость тарировки прибора (при высушивании почвы капиллярное натяжение около  $-0,8$ ,  $-1,0$  атм); усиленный рост корней вблизи установленного в почву датчика (наполненного водой пористого сосуда) и поглощение корнями находящейся в сосуде влаги. Следует подчеркнуть, что тензиометры наиболее пригодны при наблюдениях над влажностью почвы в поливных условиях, поскольку влажность почвы в этих условиях обычно не выходит за пределы действия прибора.

В 1965—1967 гг. Научно-исследовательским институтом гидрометеорологического приборостроения для использования в районах орошаемого земледелия СССР был создан тензиометр АМ-20-11, состоящий из двух частей: собственно тензиометра, устанавливаемого в почву, и съемного индикатора, позволяющего с помощью его производить отсчеты показаний всех установленных в поле приборов. Предельные глубины установки включенных в комплект тензиометров — 20, 50 и 100 см. Технические характеристики прибора таковы: диапазон измеряемой величины натяжения 0,0—0,85 атм, погрешность измерения 0,03 атм, цена деления индикатора 0,05 атм, диапазон рабочих температур —2, +50° С. Существенным преимуществом тензиометра АМ-20-11 является введение в его конструкцию съемного индикатора.

Появившиеся за последние годы радиоактивные методы определения влажности почвы могут быть подразделены на два вида: нейтронный метод и метод определения влажности почвы при помощи гамма-лучей. Нейтронный метод базируется на том, что жесткие быстрые нейтроны при столкновении с ядрами водородных атомов смягчаются и превращаются в медленные. Поэтому количество медленных нейтронов поблизости от источника жестких нейтронов обеспечивает возможность измерения содержания водорода в почве. В большинстве почв, используемых в сельском хозяйстве, единственным источником водорода практически является находящаяся в них влага, что позволяет использовать рассеивание нейтронов для объемного измерения содержания воды в почве.

При измерениях вмонтированный в зонд источник жестких нейтронов опускается на требуемую для измерения влажности почвы глубину в заранее установленную для этого специальную трубу. Последняя изготавливается из материала, обладающего низкой способностью поглощать нейтроны, — из алюминия, нержавеющей стали и др. Дно трубы должно быть совсем непроницаемо для воды. На верху трубы должна быть съемная пробка, имеющая форму маленького дождемера для измерения количества осадков, выпадающих в месте установки прибора. При опускании источника нейтронов в трубу жесткие лучи через ее стенки проходят в почву и, сталкиваясь с атомами водорода почвенной влаги, размягчаются и рассеиваются.

В результате столкновений часть медленных нейтронов отражается и достигает детектора, вмонтированного в тот же зонд, что и источник жестких лучей, бок о бок с ним. Очень важна точная геометрия установки источника. Он должен быть в самом центре трубы; его положение на вертикальной оси должно быть точно известно для определения объема почвы, влажность которой измеряется. Счет нейтронов в единицу времени относится линейно к объему воды в сфере действия зонда.

Считают, что каждый прибор должен тарироваться отдельно для каждого типа почв, поскольку присутствие хлора, бария, цинка, железа и кадмия или других веществ, ядра которых имеют свойства высокого поглощения нейтронов, сказывается на тари-

ровке прибора. Наличие больших количеств водорода в органическом веществе почв (например таких, как торфяные) действует таким же образом.

Тарировка нейтронных приборов может быть проведена несколькими путями: либо на стандартных образцах разного типа почв, либо в полевых условиях путем определения влажности параллельно со снятием показаний. В последнем случае влажность почвы, удаляемой при установке трубы, сравнивается со счетом нейтронов, полученным непосредственно вслед за этим в центре пространства, из которого удалена почва.

Достоинствами нейтронного метода являются: возможность измерять влажность почвы длительное время в одних и тех же точках; охват всего диапазона значений влагосодержания; получение результатов измерения количеств влаги в почве в объемных единицах; отсутствие отставания во времени между измеренным и фактическим количеством воды в почве; независимость результатов отсчетов от засоления почв.

К недостаткам нейтронного метода относятся: высокая стоимость, непрочность и громоздкость оборудования; невозможность правильного измерения влажности верхних слоев почвы (0—20, 0—30 см) вследствие рассеяния части медленных нейтронов в атмосферу и нижних слоев в случае резких перепадов во влажности почвы по профилю; образование трещин в местах установок труб в набухающих почвах; зависимость показаний прибора от количества органического вещества, а также хлора, железа и бора в почве [167, 268, 303, 323].

Метод измерения влажности при помощи гамма-лучей основан на том, что гамма-лучи, проходя сквозь постоянный слой почвы, ослабляются. Ослабление складывается из постоянного ослабления, вызываемого самой почвой, и ослабления, меняющегося в зависимости от количества находящейся в почве воды. Отсюда следует, что изменение содержания воды в данном слое почвы может быть определено по ослаблению гамма-лучей, проходящих через этот слой.

В построенном по этому принципу Научно-исследовательским институтом гидрометеорологического приборостроения приборе М-30-М (ИВП-64) в качестве источника гамма-лучей используется радиоактивный кобальт  $\text{Co}^{60}$  [55]. Измерение влажности почвы осуществляется при помощи вертикального пучка гамма-лучей, проходящего через постоянный слой почвы. Средняя энергия  $\text{Co}^{60}$  составляет 1,25 Мэв, период полураспада — 5,3 года. Таким образом, активность используемого в приборе препарата за каждый месяц уменьшается примерно на 1 % первоначальной. Чтобы исключить вызываемую этим ошибку, в методике измерения предусмотрен систематический контроль прибора по контрольному препарату  $\text{Co}^{60}$ .

Чувствительным элементом к гамма-лучам в приборе М-30-М является счетчик ядерных частиц. Подводимое к счетчикам напряжение равно 400 в. Счет импульсов (гамма-квантов), возникающих в счетчике ядерных частиц под действием гамма-лучей,



осуществляется с помощью специального переносного электромеханического счетчика. Так как интенсивность гамма-лучей убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, при измерении необходимо строго следить за тем, чтобы расстояние между источником гамма-лучей ( $\text{Co}^{60}$ ) и счетчиком ядерных частиц строго сохранялось.

Приборы М-30-М позволяют измерять влажность почвы во всем диапазоне величин, встречающихся в природных условиях, с точностью  $\pm 1,5\text{--}2,0\%$  веса абсолютно сухой почвы. Наиболее доработанный вариант определения влажности почвы этим прибором позволяет учитывать количество влаги в слоях почвы 0—25, 25—50, 50—75, 75—100, 0—50, 50—100 и 0—100 см (путем суммирования запасов влаги в слоях 0—25 и 25—50 см, 50—75 и 75—100 см, 0—50 и 50—100 см). Для этого в почву под углом  $45^\circ$  в одной плоскости закладываются две трубы: верхняя из них используется для погружения в почву изотопа, а нижняя — для погружения счетчика (типа СТС-6).

При наблюдениях изотоп  $\text{Co}^{60}$  при помощи рейки опускают в трубу сначала на глубину 25 см, затем на глубины 50, 75 и 100 см, соответственно помещая счетчик гамма-лучей сначала на уровень поверхности почвы, затем на глубины 25, 50 и 75 см. При опускании изотопа и счетчика на каждую из указанных глубин производится двухкратный отсчет числа импульсов в течение 2 мин по электромеханическому счетчику (типа МЭС-54).

Наблюдения по прибору М-30-М, как и наблюдения методом сушки образцов почвы, на каждом поле производятся в четырехкратной повторности. Сроки наблюдений по прибору М-30-М в связи с меньшей трудоемкостью могут быть учащены.

Поскольку изменение содержания воды в почве определяется по ослаблению гамма-лучей, при установке прибора в поле производятся параллельные отсчеты интенсивности гамма-лучей, проходящих через вышеуказанные слои почвы, и определение количества имеющейся в них в этот момент воды, т. е. определяются начальная интенсивность гамма-лучей и начальные влагозапасы. В любой другой момент измеряется интенсивность гамма-лучей, проникающих сквозь каждый из указанных слоев, и после внесения поправки на распад по соотношению с начальной их интенсивностью вычисляют изменения влагозапасов. Путем алгебраического суммирования начальных запасов влаги в почве с изменением их определяют влагозапасы в момент измерения. Для расчетов изменений запасов влаги по изменению интенсивности гамма-лучей используются специально составленные для этого таблицы. Этот метод обеспечивает непрерывность наблюдений, получение результатов наблюдений сразу же после отсчетов и сравнительно малую трудоемкость по сравнению с методом сушки.

Основным достоинством метода гамма-лучей по сравнению с другими косвенными методами является независимость получаемых результатов от других сильно варьирующих во времени свойств почвы, а также охват наблюдениями всего диапазона

влажности почвы в природных условиях. Однако при измерении описанным прибором, как и при его хранении, требуется строгое соблюдение техники безопасности, что осложняет его использование.

К числу косвенных методов, не получивших развития, относятся: метод, основанный на тепловых свойствах почвы, дистилляционный, экстракционный, карбидный, оптический и пикнометрический методы, метод по усадке почвы под давлением, метод дополнительного увлажнения почвы, диэлектрический и др. Эти методы не получили развития главным образом потому, что они не исключают наиболее трудоемкую часть работы — выемку образцов почвы в поле. Вместе с тем они не всегда достаточно точны и требуют нестандартного дорогостоящего оборудования.

Для всех методов, предусматривающих установку в почву действующих по тому или иному принципу постоянных приборов, особо остро стоит вопрос о репрезентативности получаемых с их помощью данных влажности почвы. Обычно эти методы требуют нестандартного дорогостоящего оборудования, что исключает возможность задавать требуемую повторяемость. Между тем в природных условиях, как уже об этом говорилось, влажность почвы по территории сильно варьирует. Поэтому очень важно приборы устанавливать в характерных точках. Нерепрезентативность их установки может привести к непоправимому ущербу при практическом использовании данных и ввести в заблуждение исследователя. Тем более это опасно, что нерепрезентативность установки не может быть обнаружена без дополнительных исследований.

### **Методы обработки и контроля результатов измерения почвенной влаги**

Соизмеримость, доброкачественность и эффективность использования результатов наблюдений над влажностью почвы на такой огромной территории, как Советский Союз, естественно, возможны лишь при единстве методов не только наблюдений, но и обработки материалов, строгом соблюдении всех методических требований и постоянном контроле как за самим процессом наблюдений, так и за обработкой их результатов.

Для сельскохозяйственного производства основной интерес представляет та часть почвенной влаги, которая обладает мобильностью, достаточной не только для поддержания жизни растения, но и для создания надлежащего урожая. В связи с этим для характеристики влагообеспеченности сельскохозяйственных культур целесообразно учитывать лишь продуктивную влагу, принимая влажность, соответствующую коэффициенту увядания, за нуль [30]. Это целесообразно еще и потому, что непродуктивная влага является величиной, практически постоянной для данной почвы. Все же изменения влажности почвы в полевых условиях в основном обусловлены количеством имеющейся в ней продуктивной влаги, колебания которой во времени очень велики.

Количество продуктивной влаги, или ее запасы, принято выражать в миллиметрах толщины водяного слоя. В таком виде они легко сопоставимы с данными по осадкам и испарению. Вычисление запасов продуктивной влаги производится по формуле

$$W = 0,1qh(u - k), \quad (40)$$

где  $W$  — запасы продуктивной влаги (мм),  $q$  — объемный вес (г/см<sup>3</sup>),  $h$  — мощность слоя почвы (см),  $u$  — влажность (% абсолютно сухой почвы),  $k$  — влажность устойчивого завядания (% абсолютно сухой почвы), 0,1 — коэффициент для перевода в миллиметры водяного слоя.

По методике, принятой в Гидрометслужбе СССР, запасы подсчитываются для каждого десятисантиметрового слоя почвы и в самом верхнем слое 0—5 см. Запасы влаги в слоях любой большей мощности получаются простым суммированием запасов входящих в него десятисантиметровых слоев.

Расчет запасов продуктивной влаги в почве удобно производить в специально разработанных для этого формах таблиц [198]. Эти таблицы составляются для каждой культуры в отдельности и охватывают период с момента уборки предшествующей культуры до момента уборки культуры, произрастающей на этом наблюдательном участке в данном году. Для парового поля бланк заполняется с момента уборки произрастающей на этом поле культуры до момента посева на нем другой культуры.

В раздел I таблицы вписываются средние значения влажности почвы для каждой глубины взятия проб за каждый срок наблюдений, а слева — соответствующие этим глубинам величины влажности завядания объемного веса почвы.

В раздел II вписываются общие запасы влаги, рассчитанные для каждого слоя по уравнению

$$W = \frac{uqh}{10}, \quad (41)$$

где  $W$  — общий запас влаги (мм),  $u$  — влажность (% абсолютно сухой почвы),  $q$  — объемный вес (г/см<sup>3</sup>),  $h$  — мощность слоя почвы (см), 10 — коэффициент для выражения количества влаги (мм).

В левой стороне раздела II для каждого почвенного слоя вписывается величина непродуктивной влаги. Вычисление ее производится по тому же уравнению (41), но в нем  $u$  — влажность завядания (% абсолютно сухой почвы).

В раздел III вписываются данные о содержании продуктивной влаги в отдельных почвенных слоях. Чтобы получить количество продуктивной влаги, следует из общего запаса влаги, имеющейся в этом слое, алгебраически отнять непродуктивную влагу. Когда определение влажности производится не по 10-сантиметровым слоям, запасы в слоях, где влажность не определяется, вычисляются как средние из запасов выше- и нижележащих слоев. Если влажность определяется и на глубине 5 см, запасы вычисляются для слоев 0—5 и 5—10 см.

Раздел IV заполняется данными о запасах продуктивной влаги в слоях почвы нарастающей мощности, получаемыми путем суммирования запасов в отдельных слоях, вписанных в раздел III таблицы. В тех случаях, когда в результате вычислений запасов продуктивной влаги в отдельных почвенных слоях (раздел III) получены отрицательные величины (т. е. когда влажность почвы меньше влажности устойчивого завядания), при суммировании эти отрицательные величины следует принимать равными нулю, что соответствует отсутствию продуктивной влаги в этих слоях.

Составленная и заполненная указанным выше образом таблица является итогом определения влажности почвы на том или ином наблюдательном участке за год.

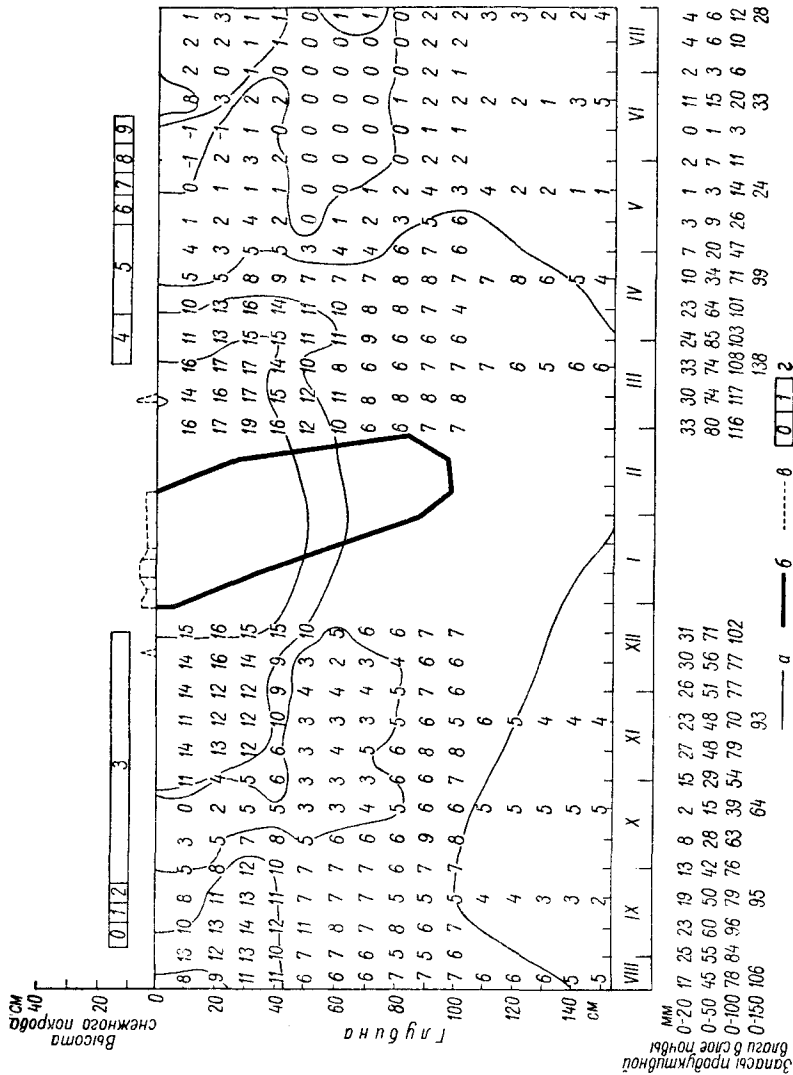
На основе данных итоговой таблицы обычно вычерчивается график, на котором запасы продуктивной влаги представляются в миллиметрах по десятисантиметровым слоям в виде цифр и изоплет, отображающих влажность всей толщи почвы, в которой она определялась с момента уборки предшествующей культуры до момента уборки культуры, произрастающей на данном участке в данном году. Поскольку на влажность почвы в холодную часть года существенное влияние оказывает промерзание почвы, то на этом же графике в виде изоплет наносятся данные наблюдений над глубиной промерзания и оттаивания почвы и некоторые другие сопутствующие наблюдения. В зимний период наносятся данные наблюдений над высотой снежного покрова, в вегетационный — над фазами развития растений (рис. 18). Такая обработка материалов наблюдений над влажностью почвы облегчает использование их для научных обобщений и при оперативном агрометеорологическом обслуживании сельскохозяйственного производства.

Необходимые для расчетов запасов продуктивной влаги в почве агрогидрологические константы (объемный вес и влажность устойчивого завядания) определяются на тех же полях и тех же глубинах, для которых определяется влажность почвы.

Для различных почв, главным образом в зависимости от их механического состава и гумификации, количество непродуктивной влаги весьма различно (табл. 8). На сельскохозяйственных полях дерново-подзолистой зоны оно колеблется от 20 до 200 мм (соотношение 1:10), в черноземной зоне — от 80 до 180 (соотношение 1:2,2). Эти различия в основном определяются величинами влажности завядания. Влияние объемного веса на количество непродуктивной влаги в почве хотя и существенно, но намного меньше.

Объемный вес подпахотных горизонтов минеральных почв в зависимости от оструктуренности и количества имеющегося в них органического вещества колеблется в пределах 1,0—1,8 г/см<sup>3</sup>. Объемный вес пахотного слоя, который, кроме указанных факторов, в значительной степени зависит еще от характера рыхления и времени обработки, колеблется в пределах 0,8—1,5 г/см<sup>3</sup> (табл. 9). Объемный вес торфяных почв намного ниже минеральных. Он зависит от степени минерализации и на слабоминерализованных почвах составляет 0,10—0,15 г/см<sup>3</sup>.

Понятно, что агрогидрологические константы, используемые для расчета запасов продуктивной влаги в почве, должны правильно отражать свойства почвы, для которой дается характеристика влажности и промерзания. Как уже ранее говорилось, любая почва, в том числе даже кажущаяся, на первый взгляд, однородной, практически при более детальном рассмотрении обнаруживает микрокомплексность — систематическую изменчивость в пределах очень небольших расстояний (20—50 см), а следовательно, и некоторую систематическую неоднородность агрогидрологических



а — изоплеты запасов продуктивной влаги в десятисантиметровых слоях почвы, б — глубина промерзания почвы (см), в — высота снежного покрова (см), г — межфазные периоды: 0 — посев — всходы, 1 — всходы — 3-й лист, 2 — 3-й лист — кушение, 3 — кушение — прекращение вегетации, 4 — возобновление вегетации — выход в трубку, 5 — выход в трубку — колошение, 6 — колошение — цветение, 7 — цветение — молочная спелость, 8 — молочная спелость — восковая спелость, 9 — восковая спелость — полная спелость.

Рис. 18. Комплексный график запасов продуктивной влаги и промерзания почвы под озимой пшеницей в 1949-50 г. Агрометеостанция Херсон.

Таблица 8

## Количество непродуктивной влаги (мм) в различных почвах

Почва	Мощность слоя почвы (см)	Количество непродуктивной влаги при влажности, соответствующей	
		максимальной гигроско- пичности	влажности устойчивого завядания
Дерново-подзолистая супесь (Вельск Архангельской области) . . . . .	0—20	3	5
	0—50	10	13
	0—100	14	19
Дерново-подзолистый легкий пыле- ватый суглинок (Белогорка Ленин- градской области) . . . . .	0—20	6	9
	0—50	14	22
	0—100	43	68
Дерново-подзолистый тяжелый су- глинок на глине (Боровичи Новго- родской области) . . . . .	0—20	12	16
	0—50	58	78
	0—100	152	203
Обыкновенный среднесуглинистый чернозем (Безенчук Куйбышевской области) . . . . .	0—20	10	14
	0—50	28	40
	0—100	59	82
Северокавказский слабовыщелочен- ный глинистый чернозем на глине (Краснодар Краснодарского края)	0—20	25	33
	0—50	64	86
	0—100	135	181
Светлый среднесуглинистый серозем (Боз-су Ташкентской области) . . .	0—20	18	25
	0—50	47	63
	0—100	95	127

Таблица 9

## Объемный вес пахотного слоя почвы (г/см³)

Почва	Пар	Озимая пшеница	Клевер
Тяжелый суглинок . . . . .	0,82	1,27	1,35
Легкий суглинок . . . . .	1,22	1,37	1,46

констант. В силу этого практически нецелесообразно ориентироваться на константы отдельных элементов микрокомплекса. Используемые константы должны оцениваться по соответствию их

всему микрокомплексу наблюдательного участка в целом. Эти же агрогидрологические константы могут быть использованы и для других наблюдательных участков, если их почвы относятся к тому же типу и к тому же микрокомплексу.

Контроль материалов наблюдений над влажностью почвы подразделяется на два этапа: а) технический контроль, задачей которого является выявление ошибок, допускаемых при вычислениях, расчетах и записях; б) критический контроль, в задачу которого входит выявление дефектных материалов наблюдений [198].

Технический контроль в основном сводится к проверке правильности записей и вычислений.

Задачей критического контроля является выявление дефектных материалов наблюдений над влажностью и промерзанием почвы на основе знания сущности явлений, их причинной обусловленности и взаимосвязи друг с другом и с другими явлениями и процессами в почве, а также прилегающем слое воздуха.

Выбраковывать данные нужно очень осторожно, имея в виду следующее:

1) влажность почвы в пределах наблюдательного участка в отдельных случаях может варьировать очень сильно под влиянием рельефа, микрорельефа, различной водопроницаемости верхнего слоя почвы, пестроты травостоя, а главным образом вследствие различной мощности генетических горизонтов, слоистости почвы и ее каменистости;

2) глубина промерзания и оттаивания почвы по отдельным повторностям также может сильно варьировать.

Указанные явления находятся в непосредственной зависимости от высоты и характера залегания снежного покрова, вида и характера растительности, степени увлажнения, типа почвы и других местных факторов. Поэтому выбраковывать материалы наблюдений, опираясь только на расхождение данных между отдельными повторностями, нельзя. Такая выбраковка может исказить действительное положение и исключить крайние величины, имеющие обычно решающее значение для оценки особенностей водного режима того или иного района.

Критический контроль материалов начинается с сопоставления наблюденных запасов продуктивной влаги с водоудерживающей способностью почвы. Для оценки правильности представленных величин следует пользоваться такими положениями.

При глубоком залегании грунтовых вод и верховодок при отсутствии мерзлоты на однородных по профилю почвах запасы влаги не могут превышать ее наименьшей влагоемкости. В тех случаях, когда наименьшая влагоемкость данной почвы не определена, можно базироваться на приводимых ниже осредненных данных (табл. 10).

При высоком залегании грунтовых вод (для суглинков около 5 м, для супесей около 3 м), а также при наличии верховодок и резкой дифференциации отдельных слоев почвы по профилю запасы влаги в отдельных слоях могут достигать величины максимальной

капиллярной влагоемкости. В тех случаях, когда зеркало грунтовых вод или верховодок залегает близко к поверхности и при бурении отмечается вода в скважинах, а также при наличии в почве мерзлого слоя запасы влаги могут приближаться к полной влагоемкости и иногда даже превышать ее.

Таблица 10

Наименьшая влагоемкость почвы (мм) продуктивной влаги		
Почвы	Слой почвы (см)	
	0—20	0—100
Суглинистые . . . . .	40—50	170—190
Супесчаные . . . . .	30—40	150—170
Песчаные . . . . .	20—30	80—120

При влажности почвы, превышающей ее наименьшую влагоемкость, обычно наблюдаются сильные отклонения влажности отдельных проб. Однако эти отклонения в талой почве укладываются в пределах «наименьшая — полная влагоемкость».

Следующим критерием при оценке надежности материалов наблюдений может служить сравнение влажности почвы с влажностью устойчивого завядания. Влажность почвы, как правило, бывает выше влажности завядания. Только в немногих, особо засушливых, районах после длительного устойчивого отсутствия осадков летом запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы могут быть исчерпаны полностью. Самые же верхние слои почвы в отдельных случаях повсеместно могут просыхать и до воздушно сухого состояния, т. е. при расчетах запасов продуктивной влаги могут получаться отрицательные величины.

Другим способом критического контроля материалов является сопоставление изменений запасов влаги в почве с условиями погоды и состоянием культуры. В тех случаях, когда контролируемая величина вызывает сомнение (изменение влажности почвы кажется не соответствующим ходу погоды и состоянию растений), она проверяется путем использования закономерностей, представленных в виде формул или соответствующих им расчетных графиков (см. главу VII). Если получается большое расхождение между проверяемой и вычисленной величинами и проверяемая величина логически не оправдана, она выбраковывается. Замена же наблюдаемых величин расчетными ни в коем случае не допускается.

При критическом контроле данных большое внимание следует также уделять агротехнике, поскольку как начальные запасы, так и динамика их могут существенно различаться в зависимости от агротехники и предшественника.



При контроле материалов влажности и промерзания почвы за холодную часть года основное внимание следует уделить наличию мерзлоты в почве, соответствию динамики влажности и промерзания почвы температурным условиям и характеру залегания снежного покрова.

Критерием правильности отметок о начале промерзания и оттаивания почвы служит наличие и смена положительных температур отрицательными и наоборот, а также наличие и устойчивость залегания снежного покрова. Следует иметь в виду, что оттаивание почвы сверху может начаться только при положительных температурах, притом лишь после схода снежного покрова (оголения почвы). Оттаивание же почвы снизу может происходить и при отрицательных температурах воздуха за счет прихода тепла из глубоких слоев почвы при условии наличия мощного снежного покрова, изолирующего почву от выходаживания.

При контроле материалов наблюдений над влажностью почвы в холодную часть года следует пользоваться основными закономерностями изменений влажности почвы в этот период, излагаемыми в главе VII.

Особого внимания требует контроль материалов над влажностью почвы в переходные периоды: ранней весной и поздней осенью, поскольку влажность почвы в эти периоды может очень быстро и сильно меняться в связи с ее промерзанием и оттаиванием.

Наибольшее практическое значение при решении ряда народнохозяйственных проблем имеют следующие показатели режима влажности и промерзания почвы: многолетние средние величины запасов продуктивной влаги в почве в отдельные даты и отрезки вегетационного периода и в сезоны года, средние величины глубин промерзания и оттаивания, длительности периодов с мерзлотой в почве, а также вероятности различных запасов влаги и различных глубин промерзания почвы.

Среднемноголетние величины запасов продуктивной влаги и промерзания почвы по каждой станции выводятся по материалам отдельных лет. Необходимо, чтобы ряды наблюдений, из которых выводятся средние, по всем культурам были однородны, т. е. для данной станции они включали бы в себя одни и те же годы и сроки наблюдений. Это обеспечит возможность сравнения водного режима и промерзания почвы по отдельным районам, полям севооборота и культурам [198].

При обработке многолетних данных влажности и промерзания почвы нередко обнаруживаются пропуски наблюдений за отдельные сроки. При сравнительно коротких рядах наблюдений (порядка 10—20 лет), которыми обычно приходится пользоваться при выведении многолетних средних, исключение этих сроков может заметно отразиться на выводах, особенно если это касается сроков с резко аномальной погодой. Вследствие этого при выведении многолетних средних величин прежде всего необходимо пополнить ряды данными за пропущенные сроки. Расчеты должны произво-

даться для каждого пропущенного срока наблюдений на основе зависимости изменений запасов влаги и промерзания почвы от условий погоды.

При расчетах данные об осадках, температуре, фазе развития культур, высоте снежного покрова берутся фактические: за период от предшествующего до пропущенного срока наблюдений, т. е. за период, для которого производится расчет.

В зоне высокого стояния грунтовых вод запасы влаги в почве в весенний период всегда превышают наименьшую влагоемкость почвы. Здесь они практически полностью определяются глубиной стояния грунтовых вод и верховодок и поэтому не могут быть рассчитаны по условиям погоды. При пополнении рядов в этой зоне запасы влаги весной в годы с пропущенными наблюдениями в первом приближении могут быть приняты равными средним запасам влаги к началу вегетационного периода, вычисленным по фактическим данным.

Все величины, полученные расчетным путем, в отличие от фактически наблюдаемых, отмечаются звездочками справа от цифры.

Применение предложенного метода пополнения рядов, как и других расчетных методов, дает возможность восполнить пропущенные величины лишь приближенно. Однако в силу того что используемые при расчетах исходные данные являются фактическими (температура, осадки, состояние растений и др.), этот метод пополнения может быть широко использован при обработке материалов многолетних наблюдений над влажностью и промерзанием почвы.

При систематизации многолетних наблюдений может оказаться, что на станции по некоторым культурам отсутствуют данные за отдельные целые годы. В таких случаях необходимо ряды наблюдений, относящиеся к разным культурам, привести к одному периоду, т. е. по этим культурам пополнить расчетным путем данные пропущенных лет. Период, к которому приводятся данные, определяется длительностью наблюдений над культурой, имеющей самый длинный ряд наблюдений. При этом в отношении влажности почвы следует учитывать, что система агротехнических приемов возделывания культуры в значительной степени сказывается на водном режиме почвы, вследствие чего для данной культуры однородными рядами наблюдений могут считаться только такие, в течение которых из года в год применялась примерно одна и та же агротехника.

В зоне высокого стояния грунтовых вод и верховодок неоднородными по условиям увлажнения следует считать наблюдения, проведенные на участках с аномальным по соотношению с другими наблюдательными участками водным режимом, т. е. на нетипичных наблюдательных участках, отмеченных при критическом контроле. Наиболее часто аномальность водного режима почвы отдельных участков в этой зоне обуславливается резким различием глубины залегания грунтовых вод и верховодок, а также почвенного покрова на наблюдательных участках.

Наблюдения с аномальным водным режимом на нетипичных участках вследствие как неоднородности агротехники, так и самих особенностей этих участков не могут быть включены в подсчеты многолетних средних. Их следует рассматривать как годы с отсутствием наблюдений над влажностью почвы под данной культурой. Они подлежат пополнению расчетными величинами.

Можно рекомендовать два пути пополнения наблюдений за пропущенные годы.

1. Пополнение пропущенных величин, дата за датой, на основе метеорологических данных и зависимостей изменений запасов продуктивной влаги, промерзания и оттаивания почвы от условий погоды подобно пополнению отдельных пропущенных сроков. При применении этого метода для пополнения данных по влажности почвы в качестве исходных запасов следует принять запасы влаги в момент последнего определения влажности почвы на данном наблюдательном участке и в зависимости от местонахождения станции (зоны), культуры и фазы ее развития нужно пользоваться соответствующими формулами или расчетными графиками, принимая каждый раз рассчитанные для предыдущего срока наблюдений запасы влаги за начальные для последующего. При применении этого метода для пополнения данных по промерзанию почвы расчет следует начинать с момента наступления отрицательных температур, для пополнения данных по оттаиванию — с момента наступления положительных температур, используя формулы, представленные в главе VIII.

2. Метод разниц для пополнения пропущенных величин применяется при расчете запасов влаги в том случае, когда отсутствуют наблюдения только по некоторым объектам (культурам). Сущность его заключается в том, что за годы параллельных наблюдений выводится средняя разница запасов влаги для каждого срока наблюдений под культурой, по которой пополняются данные, и под культурой, имеющей полный ряд наблюдений. Разница вычисляется за каждый срок наблюдений, затем алгебраически суммируется с запасами влаги, наблюдавшимися в этом году под культурой, имеющей полный ряд наблюдений. Полученными таким образом расчетными данными восполняется весь пропущенный год наблюдений.

Пополнение рядов следует начинать с объекта, по которому имеется наиболее длительный и полный ряд наблюдений над влажностью почвы. На преобладающей части территории такими объектами являются обычно озимые поля. Пополнение рядов по другим объектам целесообразно производить в том случае, если эти пополняемые годы составят не более 20% принятого для обработки по этой станции периода наблюдений.

Для того чтобы обеспечить приемлемую для практического использования точность многолетних средних величин (по запасам продуктивной влаги в метровом слое почвы с вероятной ошибкой порядка 10 мм, глубины промерзания и оттаивания почвы порядка

10 см), для основной земледельческой части СССР необходимо иметь ряды наблюдений не менее 7 лет.

Многолетние средние величины запасов продуктивной влаги, глубины промерзания и оттаивания почвы за отдельные сроки наблюдений, а также длительность периода с наличием устойчивой мерзлоты почвы рассчитываются путем суммирования погодичных данных и деления этих сумм на число лет наблюдений. Многолетние средние наибольших глубин промерзания почвы вычисляются как средние из наибольших за каждый год величин. Абсолютные максимумы и минимумы глубин промерзания, а также длительности периодов с устойчивым промерзанием почвы выбираются лишь в случаях, когда наблюдения имеются за 15 и более лет.

Многолетние средние запасы продуктивной влаги в почве за отдельные отрезки вегетационного периода (межфазные периоды) вычисляются путем суммирования этих величин за каждый год и деления полученных сумм на число лет наблюдений.

Значительно более сложным является вопрос о приведении рядов наблюдений отдельных станций к одному периоду. Широко распространенный в климатологии метод приведения по разности с реперными станциями часто оказывается неприемлемым по отношению к материалам влажности и промерзания почвы в силу большого и весьма сложного влияния местных условий (различий в глубине залегания грунтовых вод, почвенном покрове, агротехнике возделывания культур, характере залегания снежного покрова, выпадении осадков и др.). Вследствие этого при выведении многолетних средних при данном состоянии вопроса приходится ограничиваться их вычислением из фактических и полных описанных выше расчетным методом данных. При этом многолетние средние запасов влаги и промерзания почвы могут считаться сопоставимыми в тех случаях, когда ряды наблюдений не меньше 7—10 лет, поскольку средние квадратические ошибки таких рядов являются приемлемыми в практических целях (для запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы порядка  $\pm 10$  мм, глубины промерзания  $\pm 10$  см).

Вычисление повторяемости (процентов случаев) тех или иных величин влажности и промерзания почвы производится лишь по станциям, имеющим не менее чем 15-летние ряды наблюдений, притом в крупных грациях изменчивости величин. Повторяемости величин запасов влаги в отдельных слоях вычисляются для отрезков вегетации сельскохозяйственных культур, имеющих наиболее важное значение.

### **Репрезентативность запасов продуктивной влаги в почве**

В целях выявления точности определения запасов продуктивной влаги в почве по принятой в системе Гидрометслужбы методики и выявления их репрезентативности были проведены специальные исследования в двух направлениях: 1) исследовалась

точность определения влажности почвы на наблюдательном участке и возможность ее повышения путем увеличения количества буровых скважин и более рационального их размещения по площади участка; 2) выявлялась репрезентативность данных наблюдательного участка по отношению к отдельным полям и большим хозяйственным массивам.

Для решения первой задачи силами ЦИП [136] в 1956, 1957 гг. были проведены экспедиционные исследования на территории Северного Кавказа, Северного Казахстана и Кулундинской степи, кроме того, во всех основных почвенно-климатических зонах СССР были организованы тематические наблюдения. Для сравнимости данных эти наблюдения проводились по единой методике в период вегетации сельскохозяйственных культур шесть-семь раз в году. В каждый срок влажность почвы определялась в девяти скважинах, из которых четыре размещались согласно принятой в Гидрометслужбе методике, а дополнительные пять скважин — равномерно на площади наблюдательного участка. Запасы продуктивной влаги по каждой скважине вычислялись отдельно для слоев почвы 0—20, 0—50 и 0—100 см. Все полученные материалы были обработаны статистически.

Кроме средних величин влагозапасов  $M$ , вычислялись средние квадратические отклонения  $\sigma$ , средние ошибки  $m$  и ошибки с обеспеченностью 80%  $\sigma_{0,8}$ . В результате описанных исследований было установлено:

- 1) различия в характере пространственной изменчивости запасов продуктивной влаги на наблюдательных участках, занятых различными культурами, не имеют закономерного характера;

- 2) в условиях более или менее выравненного рельефа во всех почвенно-климатических зонах ни один из вариантов размещения скважин не дает систематического преимущества перед другими в отношении получения более надежных данных;

- 3) различные пункты характеризуются разной изменчивостью запасов продуктивной влаги в почве при стандартной методике их определения, причем существенных различий между территорией черноземной и нечерноземной зон в этом отношении не наблюдается;

- 4) пространственная изменчивость запасов продуктивной влаги  $\sigma$  сильно колеблется во времени; колебания эти не имеют ярко выраженного закономерного характера и наблюдаются при любом количестве повторностей;

- 5) увеличение числа повторностей не только снижает среднюю величину ошибки, но и обеспечивает большую повторяемость малых ошибок;

- 6) при практикуемой в настоящее время четырехкратной повторности на значительном количестве пунктов определение запасов продуктивной влаги на наблюдательном участке производится с точностью, меньшей 10 мм, а местами даже меньшей 15 мм; точность же определения 5 мм не обеспечивается даже девятикратной повторностью.

На основании приведенных выше исследований в настоящее время установлены погрешности определения запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в различных почвенно-климатических зонах СССР (табл. 11). Из нее следует, что средние погрешности (вероятность 60%) колеблются по территории СССР в пределах 5—18 мм, предельные (вероятность 80%) — в пределах 8—30 мм, причем наибольшие величины погрешности присущи степным районам Западной Сибири, Северного Казахстана и лесной зоне Европейской территории СССР.

Таблица 11

**Погрешность наблюдений за запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм) при определении их стандартным методом**

Почвенно-климатическая зона	Погрешность определения на наблюдательном участке		Погрешность распространения данных наблюдательного участка на площадь					
			поля		хозяйства		районов 1—3	
	средняя	предельная	средняя	предельная	средняя	предельная	средняя	предельная
1. Лесная зона ЕТС . . .	6—15	10—25	13	25	19	35	35	55
2. Лесостепная зона . . .	5—10	8—16	14	21	17	25	—	—
3. Степная зона ЕТС . . .	5—10	8—16	10	18	13	20	16	25
4. Степная зона Западной Сибири и Северного Казахстана . . .	6—18	10—30	10	18	13	20	16	25

Для суждения о репрезентативности запасов продуктивной влаги, определяемых на наблюдательных участках по принятой в системе Гидрометслужбы методике, были организованы параллельные определения влажности почвы на территории целых полей, хозяйств и районов, занятых той же культурой при аналогичных приемах возделывания [209]. Разработка полученных материалов показала, что средняя погрешность распространения данных наблюдательного участка на площадь поля по отдельным почвенно-климатическим зонам колеблется в пределах 10—14 мм, на площадь хозяйства — в пределах 13—19 мм и на площадь районов 1—3 — 16—35 мм. Предельные погрешности соответственно составляют 18—25, 20—35 и 25—55 мм (табл. 11). Наибольшие величины погрешностей присущи лесной зоне ЕТС.

Как уже говорилось, Гидрометслужбой СССР систематические наблюдения над влажностью почвы производятся на огромной территории, характеризующейся большим разнообразием почв, климатов и приемов возделывания сельскохозяйственных культур. Сеть станций, производящих эти наблюдения, весьма многочисленна, она складывалась в течение многих лет и к настоящему времени насчитывает почти две тысячи станций.

Наблюдения над влажностью почвы очень трудоемки. Поэтому возникает необходимость разработки научных основ рационального построения сети станций, позволяющей минимальным количеством пунктов обеспечить получение достаточных и надежных материалов для характеристики и прогнозов влагообеспеченности сельскохозяйственных культур на всей огромной территории СССР.

Первые исследования в этом направлении были выполнены С. А. Вериго. Они были направлены на установление принципов рационализации существующей сети станций по определению влажности почвы. В качестве предварительных условий были выдвинуты следующие требования:

- 1) задача рационализации сети пунктов наблюдений над влажностью почвы должна быть сведена к установлению границ районов, в пределах которых разница в оценке влагообеспеченности важнейших для нашей страны зерновых культур не превышала бы 0,5 балла принятой в Гидрометслужбе пятизначной шкалы;

- 2) рационализация сети должна строиться на материалах массовых стандартных сетевых метеорологических наблюдений гидрометстанций, имеющих длительные ряды.

В качестве отправного пункта для решения поставленной задачи послужили связи влагообеспеченности зерновых культур с запасами продуктивной влаги в почве и зависимости динамики запасов продуктивной влаги и темпов развития культур от метеорологических условий. На основе связи влагообеспеченности культур с влагозапасами устанавливались критерии границ районов равной влагообеспеченности, на основе зависимостей динамики запасов продуктивной влаги от метеорологических условий эти критерии были выражены в метеорологических величинах — суммах осадков и температурах воздуха.

Поскольку при равных влагозапасах и равных метеорологических условиях оценки влагообеспеченности могут быть равными только в том случае, если культура в пределах района репрезентативности находится в одной и той же фазе, или, по крайней мере, время наступления фаз отличается не более чем на 5 дней, то одним из критериев при установлении границ репрезентативности пункта наблюдений была принята одновременность наступления фаз развития культуры. Необходимость этого критерия обусловлена различием зависимости состояния культуры от запасов продуктивной влаги в разные фазы их развития. Опираясь на работы А. А. Шиголева [199, 250], для определения этого критерия использовалась температура воздуха, точнее, сумма эффективных среднесуточных температур воздуха выше  $5^{\circ}\text{C}$ . Началом вегетации считалась дата наступления среднесуточной температуры воздуха  $5^{\circ}\text{C}$  весной, концом вегетации — дата снижения температуры до  $5^{\circ}\text{C}$  осенью. Время наступления отдельных фаз развития зерновых культур устанавливалось по суммам эффективных температур, потребным для прохождения той или иной фазы развития, т. е. по термическим константам Шиголева [199, 250].

Вторым основным критерием при установлении границ репре-

зентативности районов были приняты запасы продуктивной влаги в почве. Исходя из взаимосвязи состояния зерновых культур в различные фазы их развития и запасов продуктивной влаги, было предложено районом практически одинаковой влагообеспеченности считать территорию, в пределах которой в период всходов и укоренения зерновых запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы различаются не более чем на 5—7 мм, а после укоренения (после выхода в трубку) в метровом слое — не более чем на 15—20 мм.

На основе уравнений связи между изменениями запасов продуктивной влаги и метеорологическими факторами эти критерии (т. е. разница во влагозапасах) были выражены в метеорологических величинах — величинах среднесуточной температуры воздуха и суммы осадков.

В итоге всех этих разработок было предложено районом репрезентативности пункта определений влажности почвы считать район, на территории которого различия в температуре воздуха, датах наступления температур заданных пределов и в суммах осадков не превышают следующих величин: а) в датах наступления среднесуточной температуры воздуха  $5^{\circ}\text{C}$  и выше весной и  $5^{\circ}\text{C}$  и ниже осенью  $\pm 5$  дней; б) в суммах годовых осадков  $\pm 50$  мм; в) в суммах осадков за первый месяц после наступления среднесуточной температуры  $+5^{\circ}\text{C}$  весной  $\pm 10$  мм в черноземной и  $\pm 15$  мм в дерново-подзолистой зонах, г) в суммах осадков за первый месяц после наступления  $15^{\circ}\text{C}$  весной  $\pm 15$  мм в черноземной и  $\pm 25$  мм в дерново-подзолистой зонах; д) в суммах осадков за два последних месяца перед установлением температуры  $0^{\circ}\text{C}$  осенью  $\pm 30$  мм.

Поскольку вероятности запасов продуктивной влаги, как и метеорологических элементов, в отдельные годы закономерно связаны с многолетними средними величинами, то выделение районов репрезентативности по указанным выше принципам рекомендуется производить по многолетним средним величинам, пополняя характеристикой вероятности колебаний границ по годам.

Изложенные принципы рационализации сети станций, определяющих влажность почвы, одобрены ГУГМС СССР.



## Глава VI

### БАЛАНС ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ В КОРНЕОБИТАЕМОМ СЛОЕ ПОЧВЫ

Совокупность всех величин прихода влаги в корнеобитаемый слой почвы и расхода из него называется водным балансом этого слоя почвы. Водный баланс может быть составлен за любой отрезок времени: календарный год, отдельные сезоны, за период вегетации в целом или за тот или иной отрезок вегетационного периода.

Мощность корнеобитаемого слоя для большинства зерновых культур составляет 1—1,5 м, для сеяных трав, например для люцерны, нередко превышает 2—3 м, для древесных же пород достигает даже 5 м и более. Наиболее активная часть корневой системы почти всех основных полевых культур размещается в первом верхнем метре, а в начальные фазы жизни растений ограничивается лишь двадцати- или пятидесятисантиметровым слоем. В связи со сказанным водный баланс в зависимости от поставленной цели составляется для слоев почвы различной мощности. Изменение запасов влаги в почве за период, для которого подсчитывается баланс, является итогом баланса, его сальдо.

Применительно к нуждам сельского хозяйства итог баланса целесообразно выражать в миллиметрах продуктивной влаги, т. е. той влаги, которая непосредственно участвует в формировании урожая и практически обуславливает все изменения влагосодержания почвы (поскольку непродуктивная влага является постоянной величиной для данной почвы).

Полный водный баланс почвы может быть представлен уравнением [193]

$$B_1 - B_0 = (O_c + ПГВ + ППр + ВППр + К) - (И + Д + ОГВ + ПО_{тт} + ВПО_{тт}), \quad (42)$$

где  $B_0$  — начальный запас влаги в почве,  $B_1$  — конечный запас влаги в почве,  $O_c$  — сумма осадков, достигающих поверхности почвы, ПГВ — величина притока влаги в почву из грунтовых вод, ППр — величина поверхностного притока влаги на участок, ВППр — величина внутрипочвенного притока влаги в данную почву,  $K$  — количество влаги, поступающей в почву за счет конденсации водяного пара,  $I$  — величина физического испарения влаги из почвы,  $D$  — величина десукции влаги из почвы растительностью (транспирация), ОГВ — величина оттока влаги из почвы

вниз, Потт — величина поверхностного оттока влаги, ВПотт — величина внутрпочвенного оттока влаги. Все эти величины должны относиться к одному и тому же отрезку времени.

### Поступление влаги в корнеобитаемый слой почвы

Основным источником поступления влаги в почву являются осадки. Жидкие осадки поступают в почву непосредственно при их выпадении, твердые — при снеготаянии. Количество воды, обуславливающее пополнение запасов почвенной влаги в той или иной точке, обычно существенно отличается от количества осадков, учтенных по осадкомеру (дождемеру, плювиографу) или по влагозапасам в снеге, даже в том случае, если этот учет производился на том же поле, где ведутся наблюдения над влажностью почвы. Это отличие не одинаково для всего поля. Оно определяется характером растительного покрова, рельефа и микрорельефа, пестротой почвы, состоянием поверхности поля, глубиной и характером промерзания почвы и др.

Сумма осадков  $O_c$ , достигающих поверхности почвы, зависит от степени ее покрытия, плотности и структуры растительного покрова, размеров и смачиваемости листовых пластинок, их числа и распределения по площади и высоте, а также от интенсивности, частоты и продолжительности дождей (поскольку при выпадении на сухую поверхность растений каждый раз на ее смачивание тратится новое количество влаги).

Непосредственно измерение количества осадков, фактически достигающих поверхности почвы под растительным покровом, особенно травянистым, в том числе и всех полевых культур, является делом очень сложным. Общепризнанной методики таких измерений нет. Поэтому результаты измерений не надежны, малочисленны и трудно сопоставимы друг с другом.

По данным А. А. Скворцова, при хорошо развитом растительном покрове зерновых культур (пшеницы) при каждом дожде на его смачивание расходуется 2—3 мм.

По результатам длительных исследований, проведенных в Великобритании, в зависимости от степени развития и типа растительности на ее поверхности может задержаться от 10 до 55% осадков [144].

Измерения осадков, произведенные на сельскохозяйственных полях Северного Кавказа (кукуруза, озимая пшеница и др.), показали, что на стеблях растений при незначительном ветре и осадках, не превышающих 20 мм, задерживается 3—4% осадков. При сильных ветрах этот эффект снижается примерно наполовину [237].

Осадки, достигшие поверхности почвы, впитываются ею и одновременно в соответствии с малейшими неровностями поля перераспределяются и передвигаются по его поверхности. Величина поверхностного притока влаги ППр в заданную точку будет равняться разности суммы осадков, достигших поверхности почвы, и

количества влаги, впитанной почвой за время пути, т. е. будет определяться суммой осадков, водопроницаемостью почвы, рельефом и микрорельефом поля, шероховатостью его поверхности. Пополнение же количества влаги в заданной точке за счет поверхностного притока будет равно разности поверхностного притока и оттока влаги в этой точке.

Влияние рельефа и микрорельефа на перераспределение выпавших осадков зависит от водопроницаемости почвы и интенсивности осадков. На почвах с высокой проницаемостью при дождях малой интенсивности влияние рельефа уменьшается при возрастании длины склона, а на слабопроницаемых почвах и при ливнях высокой интенсивности наблюдается обратная зависимость. По данным наблюдений на Северном Кавказе, при влажной и мерзлой почве одноразовое заполнение понижений достигает 5—6 мм и более, в Казахстане — 4—10 мм, в районах избыточного увлажнения (Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория) максимальный слой воды, аккумулированный в микропонижениях, в различные годы составлял: на зяби 10—12 мм, на стерне 5—8 мм, на лугу 2—4 мм. В среднем аккумуляцию в понижениях можно принять равной 4—6 мм. При поливах по бороздам задержка влаги в понижениях орошаемых полей в два—четыре раза больше, чем неорошаемых [237].

Процесс прохождения влаги через поверхность называется впитыванием влаги в почву, или поглощением влаги почвой. Впитывание является первой стадией процесса инфильтрации, второй стадией которого является просачивание, или фильтрация, т. е. дальнейшее передвижение и перераспределение впитавшейся в почву влаги.

Важнейшее значение для скорости впитывания воды имеет порозность поверхностного слоя. Начальная скорость впитывания на окультуренных почвах, характеризующихся высокой порозностью пахотного слоя, в два раза и более выше, чем на неокультуренных. В опытах Масгрэва и Фри на окультуренном до глубины 15 см поле начальная скорость инфильтрации достигала 78 мм/ч, а на неокультуренных — всего лишь 36 мм/ч.

На оголенных почвах наблюдается резкое снижение начальной скорости впитывания в результате уменьшения порозности поверхностного слоя вследствие уплотнения его под ударами капель и набухания глинистых частиц. Степень уплотнения зависит от размера и конечной скорости дождевых капель. Средний размер капель пропорционален интенсивности дождя в степени 0,29, а средняя скорость пропорциональна квадратному корню диаметра капли [144].

Скорость инфильтрации зависит от проницаемости всех горизонтов, причем особо большое значение имеет горизонт с наименьшей проницаемостью. По данным Ф. Л. Милторпа [144], при длительном дожде и незначительном растительном покрове минимальная скорость инфильтрации составляет: на глубоких песках и хорошо агрегированных почвах 8—11 мм/ч, на легких суглинках 4—

8 мм/ч, на тяжелых суглинках и почвах, бедных органическим веществом, 1—4 мм/ч, на солонцеватых сильно набухающих почвах менее 1 мм/ч. Он считает, что в большинстве случаев скорость инфильтрации не превышает 15 мм/ч, а при дождях низкой интенсивности вся вода впитывается в почву.

Интенсивность инфильтрации сильно изменчива во времени. Уменьшение скорости инфильтрации во времени описывается обычно или уравнением Костякова

$$i = at^b, \quad (43)$$

или уравнением Гарднера и Уидстоу

$$y = y_f + (y_0 - y_f) e^{at}. \quad (44)$$

В уравнении Костякова:  $i$  — количество воды, профильтровавшейся в почву (мм),  $t$  — время,  $a$ ,  $b$  — эмпирические константы, различные для разных почв, произведение  $ab$  равно скорости в конце отрезка времени, принятого за единицу,  $b < 1$  и характеризует уменьшение скорости во времени. В уравнении Гарднера и Уидстоу:  $y_0$  и  $y_f$  — начальное и конечное установившееся значение скорости инфильтрации  $y$ ,  $a$  — варьирующий для разных почв коэффициент.

Быстрому проникновению воды способствуют вертикальные трещины, образующиеся при высыхании глинистых почв, которые, однако, вследствие набухания почвы быстро заплывают.

На отдельных участках поля с отрицательными формами рельефа и микрорельефа может происходить пополнение запасов влаги в почве за счет поверхностного притока ППР. В тех случаях, когда просочившаяся в почву вода попадает на водонепроницаемый слой и будет передвигаться внутри почвы соответственно его уклону, пополнение запасов влаги отдельных участков поля может происходить и за счет внутрипочвенного притока ВППР.

Явление перераспределения выпавших осадков, а следовательно, и пестрота пополнения запасов почвенной влаги имеет место повсюду, но интенсивность и размеры его весьма различны. Они определяются не только количеством и интенсивностью выпавших осадков, безусловно, имеющих первостепенное значение, но в значительной степени и особенностями поля. Наиболее резко явление перераспределения выражено при поглощении талых вод.

Для измерения величин поверхностного и внутрипочвенного притока ППР и ВППР пока не имеется надежных методов. Сумму их величин обычно определяют по разности между показаниями других элементов водного баланса.

В районах с высоким залеганием почвенно-грунтовых вод, где капиллярная кайма достигает почвенной толщи, существенным источником пополнения запасов корнеобитаемого слоя является капиллярная подача влаги из грунтовых вод ПГВ. Можно считать установленным, что соответственно мощности капиллярной каймы у различных почв пополнение корнеобитаемого слоя влагой путем подачи ее снизу может происходить только в тех случаях, когда глубина залегания водного зеркала от нижней границы корнеоби-

таемого слоя не превышает для супесчаных почв 0,5—1,0 м, для легкосуглинистых 1,0—1,5 м и для тяжелосуглинистых 3,0—5,0 м. Поскольку скорость капиллярного движения воды зависит от близости водного зеркала и размеров активных пор почвы, пополнение запасов в одной и той же почве осуществляется тем быстрее, чем выше стоят грунтовые воды.

В качестве иллюстрации значения глубин залегания грунтовых вод для подпитывания корнеобитаемого слоя Харченко приводит следующие данные полевых лизиметрических измерений суточного поступления (по автору, расхода) грунтовых вод в корнеобитаемый слой почвы при различной глубине их залегания (Ростовская опытно-мелиоративная станция, 2-я декада мая 1966 г., озимая пшеница). При глубине залегания грунтовых вод 0,5 м суточное поступление составляло 8,0 мм, при глубине 1,0 м — 4,0 мм, при глубине 1,5 м — 2,5 мм, при глубине 2,0 м — 0,8 мм и при глубине 3,0 м — 0,1 мм. По данным того же автора, на Нижнедонской оросительной системе в поле с глубиной залегания грунтовых вод от 2,5 до 3,0 м расходы грунтовых вод на подпитывание корнеобитаемого слоя за период вегетации составили в 1962 г. 60 мм, в 1963 г. 30 мм и в 1964 г. 38 мм, а в поле с глубиной их залегания 1,5 м они соответственно были 250, 195 и 220 мм [237]. Наиболее интенсивное пополнение запасов влаги корнеобитаемого слоя за счет грунтовых вод при достаточно высоком их стоянии происходит на песчаных почвах, наименее интенсивное — на бесструктурных суглинистых.

Капиллярная подача воды в верхние слои почвы снизу может осуществляться лишь при наличии разницы капиллярного натяжения верхних и нижних слоев почвы (разница потенциалов), возникающей в тех случаях, когда из верхних слоев влага расходуется либо путем испарения, либо путем транспирации, либо путем перехода воды в кристаллы льда при замерзании. Причем вертикальное передвижение воды вверх будет осуществляться до тех пор, пока градиент сосущей силы превышает градиент гравитационного потенциала по величине и когда он противоположен по знаку, т. е. когда сосущая сила у поверхности почвы, выраженная в сантиметрах водного столба, больше, чем глубина залегания зеркала грунтовых вод. Если же эти градиенты уравновешены, вода в почве будет неподвижной.

В насыщенных почвах, когда почвенные поры заполнены водой, сосущая сила становится ничтожно малой и полный потенциал равен сумме гравитационного и гидростатического давления. В этих условиях теория движения воды основывается на законе Дарси (количество воды, проходящей через единицу поперечного сечения за единицу времени, пропорционально градиенту гидравлического напора).

В ненасыщенных почвах, когда не все поры заполнены водой, что практически всегда имеет место в природных условиях, количественная теория движения воды основывается на допущении, что плотность потока (т. е. объем воды, протекающей за единицу вре-

мени через единицу площади, перпендикулярной потоку) пропорциональна градиенту потенциала, а капиллярная проводимость почвы рассматривается как функция сосущей силы или влажности.

В случае гомогенных почв в изотермических условиях уравнение ненасыщенного потока может быть представлено в виде [46]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (D \cdot \nabla \theta) + \frac{\partial k}{\partial z}, \quad (45)$$

где  $\theta$  — содержание воды в долях объема,  $\nabla$  — символ градиента,  $D$  — диффузивность почвенной влаги, равная произведению частной производной сосущей силы (капиллярно-сорбционный потенциал) по влажности на капиллярную проводимость,  $k$  — капиллярная проводимость — параметр, который зависит от свойств почвы и ее влажности,  $z$  — вертикальная координата.

По наблюдениям Гарднера, диффузивность обнаруживает своеобразную зависимость от температуры. В пределах 0—40°С на легких почвах она возрастает с повышением температуры, на средних суглинках не изменяется, а в глинах уменьшается [192].

Капиллярная проводимость зависит от сосущей силы и характера почв. Она быстро падает с увеличением сосущей силы. При сосущей силе 15 бар, что примерно соответствует влажности завядания, она равна лишь одной миллионной гидравлической проводимости насыщенной почвы. При низкой сосущей силе, 10<sup>-3</sup> бар, самая высокая капиллярная проводимость, около 10<sup>3</sup> см/сутки, свойственна песчанистому суглинку, самая низкая, около 1,3 см/сутки — глине. Проводимость крупнозернистых почв уменьшается при увеличении сосущей силы гораздо быстрее, чем тонкозернистых. При сосущей силе, исчисляемой десятками долями бара, капиллярная проводимость различных почв отличается незначительно и составляет примерно 10<sup>-2</sup> см/сутки, а при сосущей силе 10 бар проводимость глины становится уже выше (около 10<sup>-5</sup> см/сутки) проводимости песчанистого суглинка (около 10<sup>-6</sup> см/сутки).

Хотя уравнение (45) по форме напоминает диффузионное уравнение, однако это не означает, что процесс передвижения воды в ненасыщенных почвах полностью идентичен диффузии, вызванной хаотическим молекулярным движением. Здесь участвует несколько механизмов, все они обусловлены взаимодействием воды с почвой [46].

Решить уравнение потока влаги для ненасыщенных почв обычно очень трудно. Аналитическое решение можно получить лишь для очень немногих случаев. Некоторые исследователи считают, что формально математический метод неприложим к решению проблемы движения воды в ненасыщенных почвах. Основная трудность заключается в том, что влагопроводность почвы является функцией ее влагосодержания, так как жидкая влага может передвигаться только через ту часть порового пространства, которая занята влагой, и, по-видимому, в разных микрообластях этой занятой влагой части порового пространства проводимость различна. В этих случаях приходится прибегать к эмпирическим

методам. В настоящее время основным методом учета притока влаги в почву из грунтовых вод ПГВ служит лизиметрический.

Дополнительным источником поступления влаги в почву является конденсация водяного пара из атмосферы К. Влага, выпадающая за счет росы (т. е. за счет осаждения водяных капель в результате конденсации водяного пара из приземного слоя воздуха на охладившуюся вследствие ночного излучения поверхность) и тумана, образующегося в результате конденсации водяного пара в приземном слое воздуха, в обычных полевых условиях практически не участвует в пополнении запасов почвенной влаги. Причина в том, что роса выпадает лишь в ясные ночи, при относительной влажности воздуха на закате около 70—75%, и количество ее, как правило, невелико, не превышает 0,2 мм за ночь, а обычно бывает гораздо меньше. Кроме того, в основном роса выпадает непосредственно на листьях растений и не достигает почвы. На обнаженной же почве росы выпадает еще значительно меньше, чем на поверхности растительности.

Туман — более редкое явление, чем роса. Но если он выпадает, то его вклад в сумму осадков гораздо значительнее. На повышенных местах количество влаги, поступающей в результате тумана, может достигать 2 мм/сутки. Однако практическое значение туман имеет лишь в некоторых прибрежных районах, где в ночное время над поверхностью суши передвигается большое количество влажного теплого воздуха.

Учет осадков, образующихся от росы и тумана, обычно производится стандартными собирающими пластинками, чаще всего пластинками Давдевани. Многие исследователи, однако, считают, что эти пластинки дают завышенные величины.

Увлажнение корнеобитаемого слоя почвы путем конденсации пара, передвигающегося из глубоко лежащих подстилающих слоев грунта, по условиям температурного режима возможно лишь в холодную часть года, когда температура корнеобитаемого слоя ниже температуры подстилающих слоев. В теплую же часть года вследствие обратного соотношения температур и обратного тока парообразной влаги может иметь место даже обеднение верхних слоев почвы влагой вследствие передачи ее в более холодные подстилающие слои.

Разные исследователи придают различное значение этому процессу в изменении почвенной влажности. А. Ф. Лебедев [119], используя собственные наблюдения и работы других исследователей, считал, что парообразное передвижение влаги в зимний период может увеличить запасы в верхнем двухметровом слое почвы в районе Одессы в отдельные годы на 60—70 мм, в районе Ростова-на-Дону в слое 125 см — на 65 мм. В отношении верхних слоев почвы небольшой мощности (0—20, 0—50 см) Лебедев большое значение придавал, кроме сезонных, суточным и непериодическим колебаниям температуры.

Ряд исследователей, особенно за последнее время, принципиально признавая процесс обогащения почвы влагой путем внутри-

почвенной конденсации, придают ему значительно меньшее значение. Причину преувеличенных результатов конденсации, полученных первой группой исследователей, они видят в недостаточно полно и четко поставленных полевых и лабораторных исследованиях и в недооценке в них роли передвижения воды в жидком виде, особенно в промерзающих почвах.

Обогащение почвы влагой путем адсорбции ее из воздуха возможно только в тех случаях, когда влажность почвы ниже максимальной гигроскопичности (этот процесс аналогичен насыщению почвы при определении максимальной гигроскопичности). С падением температуры в соответствии с увеличением относительной влажности воздуха и адсорбционной способности почвы наблюдается поглощение влаги почвой из воздуха. Этот источник пополнения почвы влагой может достигать практически значимых величин только в условиях резкой континентальности климата и высокой воздухопроницаемости почв, т. е. в пустынях и полупустынях.

При полевых исследованиях не удается точно рассчитать обогащение почвы влагой путем термической конденсации и адсорбции. Установлено, что максимальное обогащение влагой из этих двух источников наблюдается на щебенчатых и крупнопесчаных почвах пустынь и полупустынь. По данным Б. П. Орлова [159, 160], в Каракумах и в песках Апшерона почвы получают из воздуха вследствие конденсации и адсорбции около 60 мм воды за год.

### **Расход влаги из корнеобитаемого слоя почвы**

Даже в тех случаях, когда почва недонасыщена, вода, поступающая на поверхность почвы, будет передвигаться в соответствии с ее рельефом. Вода, не успевшая просочиться за время пути в почву, уходит в виде поверхностного стока. Часть просочившейся воды может уйти в виде внутрипочвенного стока по водоупорным или слабоводопроницаемым почвенным слоям в соответствии с внутрипочвенным рельефом.

Внутрипочвенный сток ВПС с сельскохозяйственных полей весьма мало изучен. Можно лишь сказать, что весной он в основном происходит по границе оттаивающего слоя, в теплую же часть года — по границе глинистых слоев и подпахотной подошве.

Поверхностный сток ПОТТ с сельскохозяйственных полей для основной части земледельческой зоны, характеризующейся равнинным рельефом, очень мал. По работам С. И. Небольсина [150], в Московской области при дождях и ливнях обычной силы летний сток не превышает 1—3% количества выпавших осадков. Иное положение в горных районах с обильным выпадением осадков. По работам Академии наук СССР, во влажных субтропиках при крутизне склонов 25—35° и ливнях огромной силы сток достигает грандиозных размеров, иногда 70—75% выпавших осадков.

В зимний период в районах с устойчивой зимой, несмотря на оттепели и, казалось бы, сильное таяние снега, стока обычно не



наблюдается. Талая вода замерзает под снегом между неровностями и образует ледяную корку. Таким образом, она включается во влагозапасы снежного покрова, а следовательно, и в весенние талые воды.

Весной повсеместно часть талых вод уносится поверхностным стоком. Количество этих потерь на сток колеблется от года к году в весьма широких пределах, от 1 до 98% водного запаса талых вод [79, 81]. Причины таких различий чаще всего кроются в степени недонасыщенности почв влагой, в глубине и характере их промерзания, а также в наличии и характере ледяной корки. Сильно и умеренно промерзшие влажные почвы обычно непроницаемы для воды, так как оттаивание почвы сверху начинается только после схода снега. По ледяной корке вода скатывается, не достигая почвы. Само собой разумеется, что основную роль в процессе формирования поверхностного стока играет также величина влагозапасов в снежном покрове и погодные условия периода снеготаяния, определяющие его интенсивность [95].

В годы с малой недонасыщенностью, сильным промерзанием почвы и наличием ледяной корки талые воды почти целиком уносятся поверхностным стоком. И наоборот, в годы с большим дефицитом влаги в почве, слабым ее промерзанием и отсутствием ледяной корки почти все количество талых вод идет на пополнение запасов влаги в почве; сток с сельскохозяйственных полей бывает ничтожен.

Изучение поверхностного стока с сельскохозяйственных полей обычно проводится методом элементарных стоковых площадок. Из самого понятия «влагоемкость почвы» очевидно, что из всей поступающей воды в корнеобитаемом слое почвы может аккумулироваться лишь то количество ее, которое не превышает влагоемкости этого слоя. Количество продуктивной влаги, удерживаемой различными почвами при насыщении их до полной влагоемкости, колеблется в пахотном слое от 70 до 100 мм, в метровом — от 200 до 440 мм. Наибольшие величины запасов продуктивной влаги при насыщении до полной влагоемкости свойственны легким супесчаным разностям, наименьшие — бесструктурным глинистым.

При насыщении до наименьшей влагоемкости структурных почв черноземной зоны в пахотном горизонте содержится 40—50 мм, а в метровом — 170—180 мм продуктивной влаги.

На дерново-подзолистых почвах наблюдается сильная обособленность генетических горизонтов с перепадами в водных свойствах на их границах. Поэтому процесс насыщения дерново-подзолистых почв влагой сходен с процессом насыщения слоистых почв (почв, развитых на двухчленных наносах, см. рис. 10). При насыщении их над стыками генетических горизонтов, а также у подошвы пахотного горизонта образуется слой повышенной влажности, по своей природе родственный капиллярной кайме. Поэтому в подзолистой зоне определить наименьшую влагоемкость методом залива площадок практически невозможно. Влажность каждого генетического горизонта после насыщения даже в условиях глубо-

кого залегания грунтовых вод близка к его капиллярной влагоемкости.

О величине наименьшей влагоемкости оподзоленных почв можно судить лишь косвенно, по разнице влажности над и под фронтом капиллярного насыщения. На основании этих соотношений получаются следующие величины запасов продуктивной влаги при насыщении почвы до наименьшей влагоемкости: в песчаных и супесчаных почвах дерново-подзолистой зоны в пахотном слое 10—15 мм, в метровом — 80—120 мм, в суглинистых — соответственно 40—50 и 140—160 мм.

Поскольку мощность генетических горизонтов в этой зоне невелика (обычно колеблется в пределах 10—20 см), то в первом приближении в качестве показателя их водоудерживающей способности можно принять максимальную капиллярную влагоемкость — количество воды, удерживаемое капиллярно-насыщенным образцом почвы с ненарушенным строением десятисантиметровой высоты.

При насыщении дерново-подзолистых почв до максимальной капиллярной влагоемкости количество влаги в пахотном горизонте колеблется в узких пределах, около 60—70 мм. Влагосодержание же метрового слоя при этом увлажнении весьма различно. На суглинистых почвах оно составляет 160—190 мм, на супесях превышает 330 мм в основном за счет влаги слоя почвы 50—100 см.

Примеры количества влаги, удерживаемой теми или другими почвами при насыщении их до полной, максимальной капиллярной и наименьшей влагоемкости, представлены в табл. 12. Вся вода, поступающая в почву сверх ее водоудерживающей способности, просочится и уйдет из корнеобитаемого слоя ОГВ.

При глубоком залегании грунтовых вод на однородных почвах в корнеобитаемом слое может удерживаться лишь количество воды, не превышающее недостаток ее насыщения (дефицит), равный разности влагозапасов при наименьшей влагоемкости и влагозапасов, имеющих в почве ко времени выпадения осадков или снеготаяния. Остальное количество поступившей воды просочится и уйдет из корнеобитаемого слоя.

При глубоком же стоянии грунтовых вод, но на слоистых почвах (например, двухчленные наносы) количество аккумулятивной влаги может превысить наименьшую влагоемкость. Оно будет определяться влагосодержанием капиллярной каймы, образовавшейся у границы слоев.

В тех случаях, когда грунтовые воды залегают неглубоко и капиллярная кайма достигает корнеобитаемого слоя, возможное количество аккумулятивной воды в корнеобитаемом слое будет определяться не только характером почвы, но и глубиной залегания грунтовых вод и будет меняться во времени в соответствии с изменением их уровня.

Обогащение корнеобитаемого слоя до его полной влагоемкости возможно лишь в тех редких случаях, когда зеркало грунтовых вод выходит на поверхность и вода заполняет все поры почвы.

Количество продуктивной влаги (мм), удерживаемой почвами при насыщении их до полной и наименьшей влагоемкости

Почва	Мощность слоя почвы (см)	Влагоемкость	
		наименьшая	полная
Дерново-подзолистая супесь (Вельск Архангельской области) . . . . .	0—20	68*	97
	0—50	166*	217
	0—100	335*	409
Дерново-подзолистый легкий пыле- ватый суглинок (Белогорка Ленин- градской области) . . . . .	0—20	62*	84
	0—50	129*	184
	0—100	191*	302
Дерново-подзолистый тяжелый су- глинок на глине (Боровичи Новго- родской области) . . . . .	0—20	61*	77
	0—50	117*	135
	0—100	160*	200
Обыкновенный среднесуглинистый чернозем (Безенчук Куйбышевской области) . . . . .	0—20	43	106
	0—50	94	237
	0—100	184	438
Северокавказский слабовыщелочен- ный глинистый чернозем на глине (Краснодар Краснодарского края)	0—20	43	78
	0—50	97	178
	0—100	180	337
Светлый среднесуглинистый серозем (Боз-су Ташкентской области) . . .	0—20	43	72
	0—50	96	183
	0—100	193	376

Примечание. Звездочкой (\*) отмечена максимальная капиллярная влагоемкость.

Расход запасов влаги, аккумулированных в корнеобитаемом слое, в основном происходит путем испарения И и транспирации (десукции) Д. Только в районах с высоким стоянием грунтовых вод может наблюдаться уменьшение запасов вследствие передвижения влаги внутрь под влиянием силы тяжести в связи с опусканием зеркала грунтовых вод, обуславливающим уменьшение влагоемкости почвы. Количество испарившейся воды принято выражать в миллиметрах слоя за сутки.

Испарение — это процесс перехода воды в парообразное состояние, обуславливающий непосредственные потери влаги с поверхности почвы, воды или через транспирацию растений. Почва и рас-

тения могут рассматриваться как пути, по которым вода поступает на испаряющую поверхность, откуда она в конце концов падает в атмосферу. Это сложное явление, многие формы которого еще не достаточно изучены.

Испарение определяется влиянием трех независимых факторов. Первым из них является наличие энергии на испаряющей поверхности, обеспечивающей потребность в скрытом тепле парообразования; вторым — способность воздуха переносить водяной пар от испаряющей поверхности; третьим — наличие воды на эффективной испаряющей поверхности [210].

Существует несколько путей оценки испарения. Наиболее старый из них — это эмпирические формулы, в большинстве своем основанные на учете средней температуры воздуха, в некоторых случаях с учетом влажности воздуха. Эти формулы слишком упрощены, поскольку не учитывают условия подстилающей поверхности, от которых сильно зависит испарение. Поэтому они практически неприменимы.

Оценка испарения на основе измерения истинного потока водяного пара над подстилающей поверхностью методом измерения турбулентных потоков и методом градиентных наблюдений также пока мало применима на практике, поскольку оба эти метода могут быть использованы лишь для коротких отрезков времени, порядка часа, и поэтому пригодны лишь в исследованиях специального назначения.

Метод теплового баланса, основанный на учете потребности тепла при переходе воды в парообразное состояние, ввиду своей сложности может быть использован лишь в качестве дополнительного к другим более простым методам.

В связи с вышесказанным для нужд сельского хозяйства в настоящее время оценка величины испарения производится на основе прямых полевых измерений, с помощью испарителей, лизиметров либо же по разности запасов влаги в начале и конце расчетного периода с учетом количества выпавших за это время осадков.

Испарение влаги И с почвы, как и с любой другой поверхности, пропорционально разности упругости пара испаряющей поверхности и прилегающего к ней воздуха. Однако в силу своеобразия и непостоянства свойств почвы как испаряющей поверхности испарение с почвы имеет специфические особенности. При одних и тех же метеорологических условиях скорость испарения с почвы меняется с изменением ее влажности: испарение резко падает с момента, когда влажность почвы опускается до предела, тормозящего подачу воды к испаряющей поверхности [31].

В насыщенных почвах, когда все капиллярные поры заполнены водой, испаряющаяся вода в силу большой ее подвижности сразу же замещается путем капиллярного поднятия. При такой влажности почвы испарение происходит, как и со свободной водной поверхности, непосредственно диффузией в воздух. Интенсивность его в этом случае определяется только разностью упругости водяного пара на поверхности почвы и прилегающего слоя воздуха,

т. е. условиями погоды. Количество испаряющейся с насыщенной почвы воды вследствие большей ее поверхности (из-за шероховатости) и более сильного нагрева (темная окраска) при одних и тех же метеорологических условиях иногда сильно превышает испарение с открытых водоемов и достигает 10—15 мм/сутки. В природных условиях такое большое испарение наблюдается при высоком залегании почвенно-грунтовых вод, обеспечивающем непрерывный капиллярный подток влаги снизу, и при орошении, пока поливные воды еще полностью не просочились, а также после обильных ливневых осадков.

С того момента, когда влажность почвы снизится до предела, при котором освободятся наиболее крупные поры и капиллярный подток воды замедлится, испарение с почвы будет зависеть не только от метеорологических условий, но и от скорости подтока влаги к испаряющей поверхности. В тех случаях, когда скорость капиллярного поднятия недостаточна, для того чтобы возместить потери на испарение, абсолютные значения испарения в основном будут зависеть от скорости капиллярного поднятия, т. е. будут определяться водоподъемной способностью почвы и глубиной залегания почвенно-грунтовых вод. В этих случаях почва будет подсыхать сверху. Глубина сухого слоя будет расти до тех пор, пока скорость диффузии пара через подсыхающий слой почвы не станет равной скорости капиллярной подачи воды. В полевых условиях при описанном увлажнении почвы максимальные величины испарения не превышают 3—4 мм/сутки.

В ненасыщенных почвах при влажности их ниже наименьшей влагоемкости, когда легкоподвижная влага отсутствует, испарение резко падает, а после разрыва капилляров оно происходит за счет высыхания верхнего слоя почвы, что влечет за собой углубление испаряющей поверхности. Скорость испарения в этих случаях определяется скоростью диффузии пара через вышележащий сухой слой почвы; величины испарения очень малы. Даже при высокой

Таблица 13

Запасы продуктивной влаги (мм) в различных слоях почвы на чистом пару в 1955 г. ст. Шортанды Целиноградской области

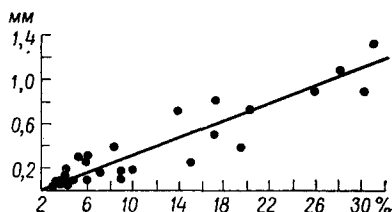
Слой почвы (см)	Дата определения влажности почвы										Расход влаги (мм) из почвы за период	
	13 V	31 V	9 VI	18 VI	29 VI	9 VII	21 VII	29 VII	15 VIII	6 X	13 V— 15 VIII	13 V— 6 X
0—10	13	9	8	2	0	0	10	0	0	0	—13	—13
0—20	33	24	13	10	10	5	23	9	8	0	—25	—33
20—50	42	40	33	35	35	29	33	35	26	28	—16	—14
50—100	32	30	31	34	32	32	30	35	31	37	—1	+5
Осадки (мм), выпавшие между сроками определения влажности	—	5,6	0	0	0	0,3	28,8	4,1	1,6	33,8	40,4	74,2

температуре и большом дефиците влажности воздуха испарение не превышает десятых долей миллиметра в сутки. Глубина просыхающего за счет физического испарения слоя почвы достигает в засушливых районах 20—30 см, а в сильнозасушливых 30—40 см, иногда и 50 см. В нижележащих же слоях почвы запасы влаги при этом почти не изменяются.

Примером этого могут служить данные запасов влаги в различных слоях парового поля в засушливом 1955 г. в Целиноградской области, представленные в табл. 13 [177]. Как видно из данных этой таблицы, в верхнем двадцатисантиметровом слое почвы запасы продуктивной влаги за вегетационный период испарились полностью, в слое 20—50 см они значительно убывли, в слое же 50—100 см никаких изменений во влажности почвы не произошло.

Рис. 19. Зависимость испарения (мм) от влажности (%) поверхностного слоя почвы (черный пар).

Испарение вычислено на 1 мм дефицита влажности воздуха.



Как велика роль увлажнения почвы для процесса испарения, можно судить по данным А. П. Федосеева [232], представленным на рис. 19. На рисунке видно, что при одном и том же дефиците влажности воздуха испарение с капиллярно-насыщенной почвы (влажность почвы 32%) составляет 1,1 мм, при наименьшей влагоемкости (влажность почвы 27%) — 1,0 мм, при коэффициенте завыдания (влажность — 8%) — 0,1 мм и при максимальной гигроскопичности (влажность почвы 5%) — меньше 0,1 мм.

Тем же автором приводятся следующие данные о влиянии влажности верхнего слоя почвы на испарение влаги. Два испарителя — лизиметры Попова — увлажнялись одинаково, до максимальной капиллярной влагоемкости. У одного из них испарение происходило непосредственно с поверхности увлажненной почвы, у другого увлажненная почва сверху была защищена трехсантиметровым слоем той же, но рыхлой и сухой почвы. В итоге за два месяца (июнь—июль 1939 г.) незащищенный монолит испарил 281 мм влаги, защищенный — только 63 мм (в четыре раза меньше). На основании этих данных и результатов других исследований Федосеев пришел к заключению, что в условиях пара быстрое просыхание верхнего слоя почвы при жаркой сухой погоде в конечном счете обуславливает меньшие потери влаги из почвы, чем медленное просыхание в холодную влажную погоду.

В природных условиях испарение с почвы при достаточном ее увлажнении, как и со всякой другой испаряющей поверхности, зависит от градиента упругости водяного пара над испаряющей поверхностью, обуславливающего скорость молекулярной диффузии пара, и от силы ветра, влияющей на скорость турбулентного

обмена. Чем больше градиенты упругости водяного пара и чем сильнее ветер, тем быстрее испаряется влага из хорошо увлажненной почвы [208].

На величину испарения влаги с поверхности почвы большое влияние оказывает также наличие и состояние растительного покрова. Благодаря его защитному действию потери на испарение с поверхности почвы под растительным покровом малы по сравнению с открытым полем: они тем меньше, чем сильнее развит покров. По данным С. Б. Мастинской [132], в Подмосковье при влажности почвы, близкой к наименьшей влагоемкости, в бездождный период (8—13 VIII) в среднем испарялось: на пару 3,1 мм/сутки, в клеверной отаве 0,3 мм/сутки, в семенниках клевера 0,2 мм/сутки.

Огромное количество продуктивной влаги из корнеобитаемого слоя (со всей его глубины) испаряется посредством транспирации Д.

Транспирация — это испарение воды живыми клетками растения. В силу анатомических и физиологических особенностей живого растения этот процесс испарения чрезвычайно сложен. Испарение происходит в межклетниках листа с выстилающих межклетники паренхимных клеток [129]. Общая поверхность межклетников в листе чрезвычайно велика, у большинства растений в 12—19 раз больше наружной поверхности листа. Выходными отверстиями для водяного пара из межклетников служат устьичные щели. Площадь отверстий этих щелей составляет лишь ничтожную часть листовой поверхности, не более 1%. Остальная часть листа одета пленкой кутикулы, мало проницаемой для водяного пара. Скорость диффузии пара через мелкие устьичные отверстия растет очень быстро с увеличением их количества: она пропорциональна диаметру пор, а не их площади. Однако в силу закона испарения воды мелкопористой поверхностью диффузия пара через устьичные отверстия листа не может превысить испарения с площади воды, равной площади этого листа. Обычно при открытых устьицах испарение листа составляет 0,4—0,5 испарения с водной поверхности. По мере закрытия устьиц транспирация снижается или совсем прекращается. Например, у хлебных злаков ночью устьица всегда закрыты. Они начинают закрываться рано вечером, поэтому процесс транспирации имеет ярко выраженный суточный ход.

На скорость транспирации большое влияние оказывает степень насыщенности водой выстилающих межклетники паренхимных клеток. При обезвоживании эти клетки труднее отдают воду вследствие увеличения в них процента связанной воды, испарение снижается. При достаточном увлажнении почвы подача воды в растение и транспирация хорошо согласуются между собой путем работы устьичного аппарата и изменения насыщенности водой испаряющих клеток. При иссушении же почвы до предела, сильно тормозящего подачу, и при значительном возрастании дефицита влажности воздуха в растениеобитаемом слое аппарат растений, регулирующий транспирацию, не в силах согласовать ее с подачей воды, в результате чего растение увядает. Таким образом, в конечном счете решающим фактором для процесса транспирации растений является наличие достаточного количества продуктивной влаги в почве.

При высоком увлажнении почвы, близком к наименьшей влагоемкости, растения расходуют огромное количество воды. При хо-

рошо развитом растительном покрове и мощной корневой системе в жаркие сухие дни расход воды на транспирацию на орошаемых полях, где запасы влаги в почве большие, достигает 10 мм/сутки. В это же время на неорошаемых полях, где запасы влаги нередко близки к коэффициенту завядания, суточный расход колеблется в пределах десятых долей миллиметра [137]. Именно этим (достаточной скоростью подачи воды в растение, компенсирующей огромные расходы воды на транспирацию) объясняется тот факт, что при оптимальных сроках и нормах полива даже в условиях полупустыни растения не теряют тургора и нормально осуществляют процесс фотосинтеза и формирования урожая.

Расход воды на транспирацию происходит из освоенного корневой системой почвенного слоя. Поэтому по мере углубления корневой системы увеличивается и мощность слоя почвы, из которого растением расходуется вода. Так, из данных табл. 14 следует, что яровая пшеница в период, когда ее корневая система уже была хорошо развита (колошение — молочная спелость), использовала влагу всего корнеобитаемого слоя, до глубины 1 м.

Таблица 14

**Транспирация влаги яровой пшеницей из различных слоев почвы в период колошение—молочная спелость. Ростов-на-Дону, 1934 г.**

Слой почвы (см)	0—20	21—40	41—60	61—80	81—100	0—100
Транспирация (мм/сутки)	1,74	1,02	1,05	0,69	0,38	4,88

Расход влаги на транспирацию из глубоких слоев почвы особенно ярко выражен на орошаемых полях, где при регулярных поливах в нижних слоях имеется достаточно большое количество продуктивной влаги.

С того момента, когда в почве остается только слабоподвижная или неподвижная влага, не столько вода подтягивается к корням, сколько, по образному выражению Н. А. Максимова [128], «корни гонятся за водой и ради нее энергично роют почву, обсасывая каждую встреченную частицу почвы, слизывают с нее тончайшие пленки воды».

Разные культуры и одна и та же культура в различные периоды своего развития в зависимости от мощности строения наземных органов, испаряющих воду, строения и мощности корневой системы, добывающей воду, расходуют на транспирацию неодинаковое количество воды даже при одинаковых условиях погоды. Суммарное количество влаги, расходуемое за весь период вегетации культуры, зависит от длительности этого периода [7].

Из изложенного выше следует, что факторами, определяющими величину транспирации, являются:

1) условия погоды, определяющие температуру растения и температуру и дефицит влажности растениеобитаемого слоя воздуха;



- 2) влажность почвы, определяющая мобильность и доступность для растений влаги в корнеобитаемом слое почвы;
- 3) облиственность и строение листьев растения, определяющие величину испаряющей поверхности;
- 4) мощность и строение корневой системы, обеспечивающей подачу воды в растение;
- 5) продолжительность периода вегетации культуры, определяющая длительность периода транспирации.

Суммарные расходы влаги на испарение почвой и транспирацию ее растениями достигают огромных величин. Они в первую очередь определяются количеством воды, которое может быть израсходовано из почвы, — водными ресурсами. В табл. 15 представлены суммарные расходы влаги яровой пшеницей в основные отрезки периода ее вегетации на орошаемых и неорошаемых полях в засушливых степях Кулунды [183]. Как видно из этих данных, при одних и тех же погодных условиях расходы влаги из почвы на орошаемых участках вследствие больших влагозапасов в отдельные периоды в восемь—десять раз превышают расходы неорошаемого поля.

Таблица 15

**Средние за период запасы влаги (мм) и суммарные расходы ее (мм/сутки) из слоя почвы 0—100 см на неорошаемых и орошаемых полях яровой пшеницы в 1957 г. в Кулундинской степи**

Период вегетации	Неорошаемое поле				Орошаемое поле			
	запасы продуктивной влаги	расходы из почвы	осадки	суммарные расходы	запасы продуктивной влаги	расходы из почвы	осадки	суммарные расходы
Посев—выход в трубку	45	0,6	0,8	1,4	126	1,8	0,4	2,2
Выход в трубку — колошение . . . . .	32	0,9	0,9	1,8	138	6,7	1,2	7,9
Колошение—молочная спелость . . . . .	17	0,6	0,7	1,3	126	6,9	0,5	7,4
Молочная спелость—восковая спелость . . .	15	—0,4	2,3	1,9	144	3,7	2,3	6,0

Соотношение расходов влаги на транспирацию (т. е. производительные расходы) и на испарение почвой (непроизводительные расходы) в течение вегетационного периода культуры существенно меняется. Пока культура не образовала сомкнутого покрова, непроизводительные расходы имеют большой удельный вес. У пшеницы, например, в период всходы — выход растений в трубку они составляют около 40—50 % суммарных расходов. После образования сомкнутого покрова основная доля расходов влаги приходится на транспирацию. При этом чем лучше развит растительный по-

кров и чем более он затеняет почву, тем меньше непроизводительные расходы влаги на испарение почвой.

Так, в период выход в трубку — колошение, когда мощность растительного покрова максимальная, непроизводительные расходы влаги в полевых условиях под пшеницей составляют лишь 10—15% и даже на неорошаемых снижаются до 30—35%. В среднем же за весь вегетационный период непроизводительные расходы под пшеницей составляют около 40% на неорошаемых и около 20% на орошаемых полях.

Методами учета расходов влаги на испарение и транспирацию, имеющими наибольшее распространение в настоящее время, являются метод испарителей, лизиметров и метод упрощенного водного баланса.

Метод испарителей сводится к учету испарения путем взвешивания сосудов либо с монолитами почвы, либо почвы с произрастающими в ней растениями. Разность в весе испарителя предшествующего и последующего срока плюс осадки, выпавшие за период между взвешиваниями, принимается за величину испарения. В тех случаях, когда в монолите не имеется растений, полученная величина характеризует испарение непосредственно с почвы. В тех случаях, когда в монолите имеется почва с растениями, полученная величина характеризует суммарное испарение (испарение почвой и транспирацию растениями).

До 30-х годов двадцатого столетия наибольшее распространение имели испарители Рыкачева [90], в последующем — испарители Попова [166]. В настоящее время на сети станций Гидрометслужбы СССР используются имеющие подъемное устройство для взвешивания почвенные испарители ГГИ-500-50 (рис. 20).

Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) был разработан и другой тип испарителя — гидравлический [229]. Он позволяет производить учет испарения с больших монолитов (высотой 2 м и площадью 5 м<sup>2</sup>) при естественном состоянии почв и растений и обеспечивает очень большую точность учета испарившейся воды, до 0,01 мм. Благодаря такой большой точности эти испарители позволяют учитывать не только испарение, но и конденсацию. Кроме этих больших испарителей, ГГИ сконструированы для полевых наблюдений гидравлические испарители малых размеров, высотой 1,25 м и площадью 0,2 м<sup>2</sup>.

За последнее время для учета суммарного испарения широко применяется метод упрощенного водного баланса. При его использовании допускается, что расходы на испарение и транспирацию равны алгебраической разности влагозапасов почвы в начале и конце периода, за который производится расчет, плюс выпавшие за это же время осадки. Этот метод может быть применен только в тех случаях, когда исключена всякая возможность стока, просачивания воды из корнеобитаемого слоя и поступления воды путем капиллярного подъема из нижележащих слоев.

Для выделения из суммарных расходов воды доли расхода, приходящегося на испарение с почвы, обычно под растительным

покровом устанавливаются испарители без растений (только с почвой). Разность суммарных расходов влаги и расходов по показаниям этих испарителей считают расходами на транспирацию. Так как малейшее нарушение растительного покрова искажает данные об испарении с почвы под растениями (изменяется укрытие почвы и фитоклимат в месте установки испарителей), то в последнее время для учета испарения с почвы используются испарители с малыми монолитами (диаметром 7—10 см), а не обычного типа [207]. Смена и перезарядка этих монолитов производится в зависимости от условий один или два раза в сутки.

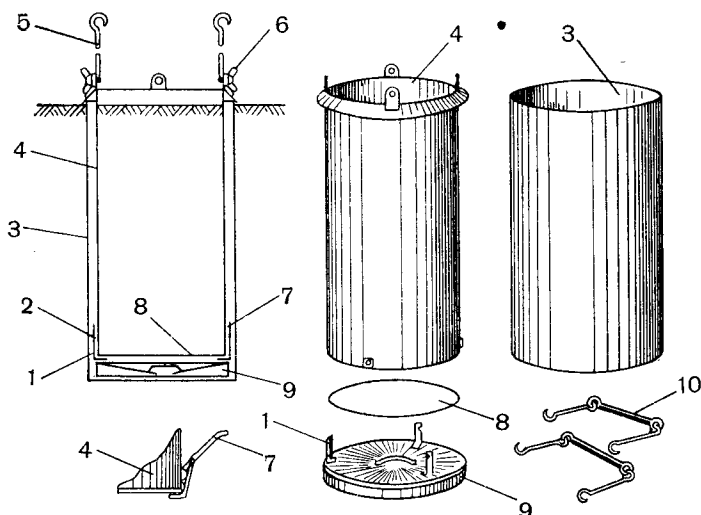


Рис. 20. Почвенный испаритель ГГИ-500-50.

1 — планка с вырезом, 2 — штифт, 3 — гнездо, 4 — внутренний цилиндр, 5 — подъемный крючок, 6 — ушко, 7 — защелка, 8 — дно, 9 — водосборный сосуд, 10 — ручка для переноски испарителя.

Изменение запасов влаги в корнеобитаемом слое почвы за промежуток времени, для которого рассчитывается баланс  $B_1 - B_0$ , определяется как разность между влагосодержанием корнеобитаемого слоя в начале и конце расчетного периода. Методика определения этих влагозапасов изложена в главе V.

Расчеты и анализ полного уравнения водного баланса сельскохозяйственных полей показали, что для измерения некоторых величин, входящих в это уравнение, пока нет надежных методов. Прежде всего к таким величинам относятся внутрипочвенный приток и отток влаги ВППр и ВПОтт. Некоторые элементы водного баланса, как например, конденсация водяного пара К и летний поверхностный сток ПОтт, не имеют сколько-нибудь существенного количественного значения, по крайней мере, на подавляющей части территории земледельческих районов нашей страны. Поэтому

обычно при расчетах эти элементы из полного водного баланса исключаются, используется уравнение

$$B_1 - B_0 = (O_c + ПГВ) - (И + Д + ОГВ). \quad (46)$$

Однако и это уравнение трудно использовать, так как обычно нет непосредственных данных о количестве достигших почвы осадков. Не расчленены расходы влаги на физическое испарение из почвы И и на транспирацию Д. Очень мало данных о притоке влаги в почву из грунтовых вод ПГВ и об оттоке ее в грунтовые воды ОГВ. Исключение в этом отношении составляют лишь специальные наблюдения и исследования, проводимые в отдельных пунктах нашей страны (водно-балансовые станции с полной программой наблюдений). Поэтому в практике расчетов, проводимых в сельскохозяйственных целях, часто пользуются упрощенной формулой водного баланса

$$B_1 - B_0 = O_c - P, \quad (47)$$

где  $P$  — суммарный расход влаги из корнеобитаемого слоя почвы. Если  $P$  имеет отрицательный знак, это означает, что происходит расход влаги из почвы, если положительный знак — приход влаги в почву. В условиях ненасыщенных почв и глубокого залегания грунтовых вод  $P$  равно суммарному испарению  $И + Д$ .

## Глава VII

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

Каждый из рассмотренных выше элементов водного баланса меняется во времени и пространстве по свойственным ему закономерностям. Поэтому непрерывно меняется во времени и пространстве и сальдо баланса — запасы влаги корнеобитаемого слоя почвы.

Земледельческая зона Советского Союза почти вся располагается в умеренных широтах, где радиационный режим имеет ярко выраженный годовой ход с резким выделением холодного (зима) и теплого (лето) периодов. Зимой приток радиации меньше потерь тепла на излучение — радиационный баланс отрицателен, в результате чего происходит сильное выхолаживание, замерзание почвы и покрытие ее снежным покровом. Летом приток суммарной радиации превышает эффективное излучение земной поверхности — радиационный баланс положителен. Избыток получаемого тепла в этот сезон года расходуется на таяние снега, нагревание воздуха и почвы, испарение воды с ее поверхности и на транспирацию. Наличие ярко выраженных холодного и теплого сезонов года является одним из решающих факторов в динамике водного режима и формировании запасов влаги в почвах. Поэтому характеристика закономерностей формирования запасов продуктивной влаги на территории СССР дается в разрезе теплого и холодного сезонов.

Для выявления закономерностей формирования и динамики запасов почвенной влаги на территории СССР были использованы многолетние систематические наблюдения над влажностью почвы сети станций Гидрометслужбы СССР, организованные по единой методике во всех земледельческих районах нашей страны, а также материалы опытных сельскохозяйственных станций и других научных учреждений. Кроме того, в этих целях проводились специальные полевые и лабораторные исследования рядом научных учреждений Гидрометслужбы.

При характеристике особенностей формирования запасов почвенной влаги в настоящей работе в качестве иллюстративных материалов используются данные типичных по водному режиму агрометеостанций, расположенных в основных почвенно-климатических зонах СССР и имеющих многолетние ряды высококачественных наблюдений (ст. Белогорка Ленинградской области; ст. Батищево

Среднемесячные температуры воздуха и суммы осадков

Станция	I			II			III			IV			V			VI		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
Температура (°C)																		
Батицево	-9,2	-8,7	-4,6	0,2	3,6	7,0	9,6	11,7	12,7	14,1	15,0	15,9						
Белогорка	-8,6	-8,8	-4,8	0,2	2,7	5,2	7,5	9,3	10,8	12,4	13,7	14,8						
Безенчук	-13,4	-13,3	-7,1	0,0	4,0	9,5	12,3	14,3	16,1	17,6	18,8	20,0						
Синельниково	-6,5	-6,2	-0,8	4,6	7,6	10,6	13,5	15,4	16,4	17,4	18,3	19,4						
Осадки (мм)																		
Батицево	26	24	29	11	12	14	15	18	20	23	28	28						
Белогорка	30	27	29	10	10	10	12	16	20	23	23	23						
Безенчук	17	14	19	7	8	8	10	12	14	13	14	14						
Синельниково	26	19	22	10	11	11	12	14	15	18	20	21						
Температура (°C)																		
Станция	VII			VIII			IX			X			XI	XII				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
Температура (°C)																		
Батицево	16,6	17,2	17,4	16,6	15,4	13,9	12,1	10,2	8,3	6,4	4,3	2,4	-1,9	-7,4				
Белогорка	15,9	16,6	16,7	15,9	14,4	12,9	11,1	9,4	7,8	5,8	4,0	2,1	-1,5	-6,4				
Безенчук	21,0	21,6	21,7	20,9	19,5	17,6	15,0	12,6	10,0	7,4	4,6	2,0	-3,4	-10,7				
Синельниково	20,6	21,4	21,5	20,5	20,3	18,7	16,6	14,4	12,3	10,2	8,1	6,0	1,2	-4,1				
Осадки (мм)																		
Батицево	28	30	28	27	27	25	17	17	17	19	19	18	46	33				
Белогорка	22	22	24	30	31	30	28	25	22	19	17	16	47	38				
Безенчук	14	13	13	14	15	14	14	12	12	12	12	11	30	18				
Синельниково	21	20	18	16	15	13	11	10	9	9	10	10	31	31				

Таблица 17

## Характеристика отдельных сезонов года

Станция	Дата перехода среднесуточной температуры воздуха				Длительность вегетационного периода (дни)	Сумма эффективных температур за вегетационный период	Сумма осадков (мм)			Высота снежного покрова, средняя из наибольших декадных высот за зиму (см)
	весной		осенью				теплый период (IV—X)	холодный период (XI—III)	год	
	через 0° С	через 5° С	через 5° С	через 0° С						
Батищево	4 IV	19 IV	12 X	6 XI	175	1480	441	158	599	33
Белогорка	6 IV	25 IV	10 X	7 XI	168	1160	433	171	604	43
Безенчук	2 IV	16 IV	14 X	2 XI	180	1950	256	98	354	27
Синельниково . . .	18 III	6 IV	1 XI	21 XI	210	2420	294	129	423	10

Таблица 18

## Агрогидрологические свойства почв

Слой почвы (см)	Объемный вес (г/см³)	Максимальная гигроскопичность (мм)	Коэффициент увядания (мм)	Влагоемкость (мм продуктивной влаги)		Общая скважность (%)
				наименьшая	полная	
Дерново-подзолистый суглинок <sup>1</sup> (Батищево)						
0—10	1,28	4,2	5,6	41	46	52
10—20	1,31	8,3	11,2	34	40	51
20—30	1,47	10,4	14,2	30	37	45
30—40	1,49	10,4	13,7	27	32	45
40—50	1,51	5,7	7,6	34	37	44
50—60	1,55	5,4	7,3	31	37	44
60—70	1,50	5,5	7,4	30	37	44
70—80	1,44	8,9	11,8	26	35	46
80—90	1,52	8,8	11,8	28	32	44
90—100	1,55	5,9	7,8	31	35	42
0—20	1,30	12,5	16,8	75	86	52
0—50	1,41	39,0	52,3	166	192	47
50—100	1,51	34,5	46,1	146	176	44
0—100	1,46	73,5	98,4	312	368	46

## Обыкновенный среднесуглинистый чернозем (Безенчук)

0—10	0,88	4,4	6,2	23	54	60
10—20	1,01	5,5	7,7	20	52	60
20—30	1,31	6,5	9,1	17	46	55
30—40	1,33	6,0	8,4	17	43	51
40—50	1,33	6,0	8,4	17	42	50
50—60	1,35	6,5	9,1	18	41	50
60—70	1,31	6,5	9,1	18	40	49
70—80	1,31	5,4	7,6	18	41	49
80—90	1,41	6,0	8,4	18	40	48

Слой почвы (см)	Объемный вес (г/см <sup>3</sup> )	Максималь- ная гигроско- пичность (мм)	Коэффициент увядания (мм)	Влагоемкость (мм продуктивной влаги)		Общая скважность (%)
				наимень- шая	полная	
90—100	1,45	6,0	8,4	18	39	47
0—20	0,94	9,9	13,9	43	106	60
0—50	1,17	28,4	39,8	94	237	55
50—100	1,37	30,4	42,6	90	201	49
0—100	1,27	58,8	82,4	184	438	52

Дерново-подзолистый пылеватый суглинок <sup>1</sup> (Белогорка)

0—10	1,40	2,9	4,5	31	42	46
10—20	1,40	2,9	4,5	31	42	46
20—30	1,59	2,1	3,2	28	37	40
30—40	1,64	2,6	4,2	22	34	38
40—50	1,75	3,4	5,4	17	29	34
50—60	1,78	5,0	8,0	13	25	33
60—70	1,83	6,5	10,5	11	22	32
70—80	1,83	6,1	9,6	12	23	32
80—90	1,82	5,6	8,8	13	24	33
90—100	1,82	5,6	8,8	13	24	33
0—20	1,40	5,8	9,0	62	84	46
0—50	1,56	13,9	21,8	129	184	41
50—100	1,82	28,8	45,7	62	118	33
0—100	1,69	42,7	67,5	191	302	37

Обыкновенный суглинистый чернозем на лёссе (Синельниково)

0—10	1,10	7,3	9,6	24	49	58
10—20	1,21	9,4	12,5	22	45	57
20—30	1,24	10,2	13,3	19	39	52
30—40	1,23	9,7	12,9	18	38	51
40—50	1,29	10,1	13,6	17	36	50
50—60	1,39	12,1	16,2	17	32	48
60—70	1,40	12,4	16,7	16	31	48
70—80	1,41	12,4	16,7	16	31	48
80—90	1,42	12,6	17,0	15	31	48
90—100	1,41	12,8	17,2	15	30	47
0—20	1,16	16,7	22,1	46	94	58
0—50	1,21	46,7	61,9	100	207	54
50—100	1,41	62,3	83,8	79	155	48
0—100	1,29	109,0	145,7	179	362	51

<sup>1</sup> В графе «Влагоемкость наименьшая» указана максимальная капиллярная влагоемкость.

Смоленской области; ст. Безенчук Куйбышевской области и ст. Синельниково Днепропетровской области).

Основные характеристики климатических особенностей и агро-гидрологических свойств почв этих станций представлены в табл. 16, 17 и 18. Как видим, климатические и почвенные условия районов расположения этих станций весьма различны.



На ст. Синельниково сумма эффективных температур<sup>1</sup> за вегетационный период составляет 2420°С, на ст. Белогорка — лишь 1160°С. Длительность вегетационного периода<sup>2</sup> на этих станциях различается на 42 дня. Количество осадков за теплый период колеблется от 256 (Безенчук) до 441 мм (Батищево).

Для сравнения подобраны станции с почвами, однородными по механическому составу (суглинистые) и различными по генезису. Почвы станций Батищево и Белогорка оподзоленные, станций Безенчук и Синельниково — черноземные (табл. 18). Глубина почвенно-грунтовых вод на ст. Белогорка 3—4 м; на ст. Батищево в отдельные периоды года они достигают пахотного слоя, на станциях Безенчук и Синельниково почвенно-грунтовые воды залегают глубоко, корнеобитаемый слой практически находится вне их воздействия.

### **Формирование запасов почвенной влаги в холодную часть года**

В холодную часть года из водного баланса исключаются такие значимые составляющие, как расход влаги на транспирацию, а в преобладающую часть этого периода, когда почва укрыта снегом, и расход влаги на испарение с почвы. На первое место выступает изменение запасов влаги путем внутрипочвенного передвижения под влиянием кристаллизации в процессе промерзания и накопления запасов за счет осадков и талых вод.

Как уже говорилось, решающими факторами внутрипочвенного передвижения влаги зимой являются градиенты температуры в промерзающей почве, степень ее увлажнения и глубина залегания почвенно-грунтовых вод.

Разработка материалов полевых наблюдений над водным режимом в холодную часть года в СССР позволила выделить три типа изменения влагозапасов в процессе промерзания почвы зимой [174, 175]: 1) с сильным влагонакоплением, 2) с незначительным влагонакоплением, 3) переходный тип.

Тип с сильным накоплением свойствен районам с высокой влажностью почвы в осенний период и неглубоким залеганием почвенно-грунтовых вод. Анализ материалов показал, что в таких районах в период с устойчивым промерзанием и устойчивым залеганием снежного покрова, когда проникновение воды в почву сверху исключено, запасы влаги в верхнем замерзающем слое возрастают. При этом слой почвы с высокой водонасыщенностью по мере углубления фронта промерзания все более и более увеличивается. Это видно на примере, представленном на рис. 21, где показана динамика запасов продуктивной влаги на ст. Белогорка по данным характерного для сырых лет 1935-36 г.

<sup>1</sup> Эффективная температура — среднесуточная температура выше 5°С.

<sup>2</sup> Вегетационный период — период со среднесуточными температурами выше 5°С.

В этот год вследствие обильных дождей уже осенью почва была избыточно увлажнена, временами зеркало грунтовых вод выходило на дневную поверхность и часть озимого поля была под водой (гидроизоплеты круто опускаются вниз). Затем избыточная вода сошла. В октябре произошло первое неустойчивое подмерзание почвы, вызвавшее заметное подтягивание влаги из нижних слоев вверх, вследствие чего запасы верхнего десятисантиметрового

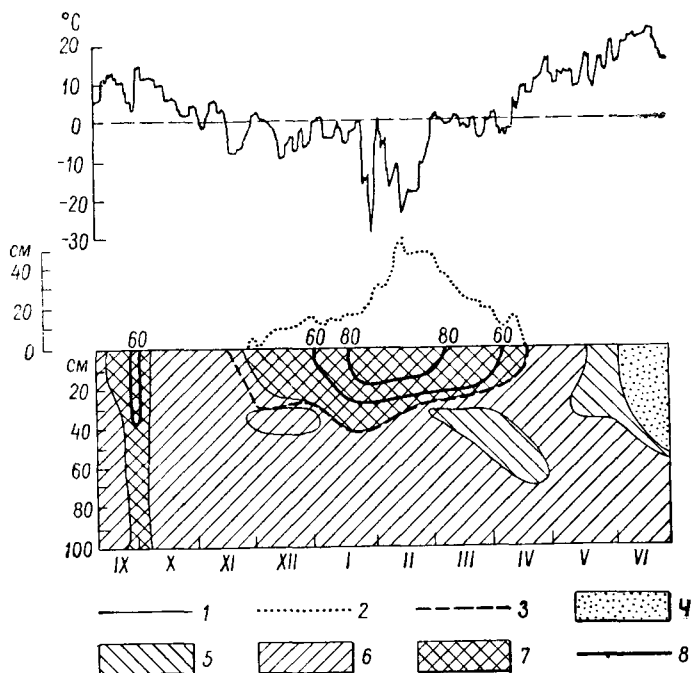


Рис. 21. Запасы влаги в почве зимой 1935-36 г. под озимой рожью. Агрометеостанция Белогорка Ленинградской области.

1 — среднесуточная температура воздуха, 2 — высота снежного покрова, 3 — глубина промерзания почвы; запасы влаги в пределах: 4 — влажность завядания — наименьшая влагоемкость почвы, 5 — наименьшая влагоемкость — максимальная капиллярная влагоемкость почвы, 6 — максимальная капиллярная влагоемкость — полная влагоемкость почвы, 7 — выше полной влагоемкости почвы, 8 — изоплеты запасов влаги в десятисантиметровом слое почвы (мм).

слоя поднялись почти до полной влагоемкости почвы. Начавшееся после некоторого перерыва следующее, уже устойчивое, промерзание сопровождалось значительно большим увеличением влажности промерзающих слоев почвы. В отдельные периоды запасы воды достигали 75—85 мм на каждый слой почвы толщиной 10 см, т. е. почти в два раза превышали полную влагоемкость верхнего десятисантиметрового слоя. Вблизи фронта промерзания скопление воды было несколько меньшим, но все же лишь немного отличалось от полной влагоемкости соответствующих слоев. Глубже 40 см, где почва не промерзала, запасы влаги с наступлением

зимы изменились мало, но, что характерно, все время держались выше максимальной капиллярной влагоемкости. Отсюда можно заключить, что подтягиваемая к фронту промерзания из этих нижних слоев почвы влага все время пополнялась за счет грунтовых вод, что привело к избыточному ее скоплению в верхних слоях почвы без иссушения нижних.

В результате увлажнение отдельных слоев почвенного профиля в период максимального влагонакопления в 1935-36 г. оказалось следующим. В слое почвы 0—20 см, соответствующем полностью промерзшему аккумулятивному горизонту, имелось 175 мм продуктивной влаги, что составляет 280% максимальной капиллярной и 120% полной влагоемкости этого горизонта почвы. В слое 0—40 см, включающем горизонты  $A_1$ ,  $A_2$  и  $B$  и промерзшем почти на глубину 40 см, имелось 310 мм продуктивной влаги, что составляет 240% максимальной капиллярной и 170% полной влагоемкости. В слое 50—100 см, в совершенно непромерзшем горизонте  $C$ , влаги оказалось 75 мм, т. е. 120% максимальной капиллярной влагоемкости и лишь 64% полной влагоемкости этого слоя. Влагозапасы слоя 100 см в целом в этот сильно переувлажненный с осени год в период зимнего промерзания были 385 мм, что составило 200% запасов продуктивной влаги, соответствующих максимальной капиллярной и 127% полной влагоемкости.

Анализ водного режима почвы за другие годы показывает, что абсолютные количества запасов влаги в том или другом горизонте из года в год меняются, но соотношение влагонасыщенности горизонтов остается тем же, что в 1935-36 г., т. е. влагонасыщенность замерзающих слоев почвы зимой всегда резко увеличивается по отношению к осени, в то время как влагонасыщенность нижних, незамерзающих, слоев (50—100 см) остается почти без изменения, а чаще несколько уменьшается по сравнению с осенней. Последнее наблюдается в сухие годы, когда подток воды снизу из слоев почвы, лежащих глубже 100 см, к концу зимы прерывается и пополнения влаги в слое почвы 50—100 см не происходит. Примером

Таблица 19

**Запасы продуктивной влаги и глубина сезонного промерзания в почве в 1937-38 г. Ст. Белогорка**

Слой почвы (см)	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV
Запасы влаги (мм)								
0—20	47	48	75	75	62	69	78	68
0—50	114	102	145	134	122	125	168	142
50—100	84	84	86	74	86	61	—	72
0—100	198	186	231	208	208	186	—	214
Глубина промерзания (см)	0	0	0	7	0	0	0	0

этого может служить 1936-37 г., характеризующийся выпадением небольшого количества осадков в летне-осенний период.

Из периода более чем двадцатилетних наблюдений лишь один 1937-38 г. характеризовался иным режимом почвенной влажности: в этом году не наблюдалось сильного влагонакопления в верхних слоях почвы зимой (табл. 19). Это был единственный год, когда произошло оттаивание почвы под глубоким снежным покровом зимой и когда, таким образом, характерный для района Белогорской агрометеостанции тип мерзлотного процесса был нарушен.

Роль парообразного передвижения в описанном выше процессе увеличения запасов влаги в почве зимой в условиях Белогорской

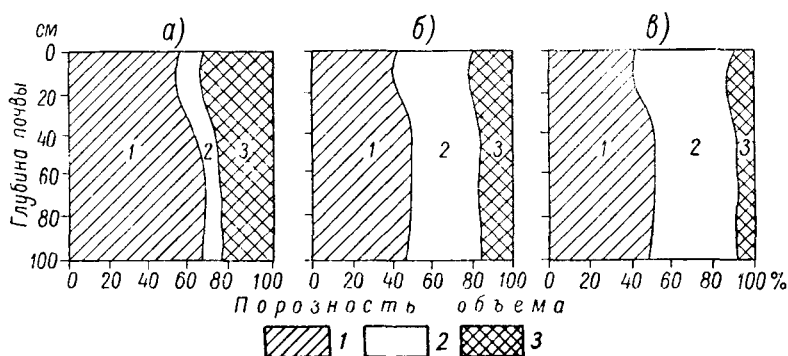


Рис. 22. Свободная от воды порозность почвы к началу сезонного промерзания.

*а* — Белогорская агрометеостанция, озимое поле, *б* — Безенчукская агрометеостанция, озимое поле, *в* — зябь из-под яровой пшеницы; 1 — объем, занятый почвой, 2 — объем, свободный от воды, 3 — объем, занятый водой.

агрометеостанции, очевидно, ничтожна, так как градиенты температуры, а следовательно, и разности упругости водяного пара по почвенному профилю невелики (табл. 20), а свободная от воды порозность, весьма незначительная в предзимний период (рис. 22), зимой практически отсутствует: в верхнем замерзающем слое все

Таблица 20

**Среднегоголетние максимумы отрицательных градиентов упругости водяного пара, рассчитанные для слоя почвы толщиной 10 см, и длительность периода с отрицательными градиентами в почве. Ст. Белогорка**

Слой почвы (см)	Градиент (мм)	Длительность периода (декады)
20—40	0,22	22
40—80	0,25	23
80—100	0,12	23

поры забиты льдом (количество влаги превышает полную влагоемкость), а в подстиляющем талом слое она не превышает 10% объема почвы.

Многолетние наблюдения Белогорской станции показывают, что за период устойчивого промерзания почвы в верхнем, ежегодно полностью промерзающем двадцатисантиметровом слое за зиму запасы влаги в среднем увеличиваются на 55 мм. В слое 0—50 см, в отдельные годы промерзающем не на полную глубину, запасы влаги увеличиваются на 49 мм. В нижнем же непромерзающем слое 50—100 см запасы влаги уменьшаются на 6 мм. В результате во всем слое 100 см запасы за зиму возрастают на 43 мм (табл. 21).

Таблица 21

Среднемноголетние запасы продуктивной влаги к концу месяца в холодную часть года в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод. Ст. Белогорка

Слой почвы (см)	Влагоемкость почвы в талом состоянии		Запасы влаги (мм)								Изменение запасов влаги в период	
	максимальная капиллярная	полная	осень		период устойчивого промерзания						устойчивого промерзания (ноябрь— февраль)	с марта до полного оттаивания почвы
			IX	X	XI	XII	I	II	III	после полного оттаивания		
0—20	62	84	54	59	60	79	106	115	105	54	+55	—51
0—50	129	184	112	127	144	159	180	193	197	110	+49	—87
50—100	62	118	81	80	73	78	67	67	60	71	—6	+11
0—100	191	302	193	207	217	237	247	260	257	181	+43	—76
Среднемного- летняя глубина про- мерзания почвы (см)					7	24	35	40	44			

Вероятность лет с различным увлажнением почвы зимой в районах с высокой влажностью и высоким залеганием почвенно-грунтовых вод представлена в табл. 22. Как видим, водонасыщенность верхних замерзающих слоев почвы ежегодно превышает капиллярную, а во многих случаях и полную влагоемкость. В нижних, незамерзающих, слоях влажность почвы удерживается выше капиллярной влагоемкости, но никогда не повышается до полной влагоемкости. В годы же со значительным снижением уровня почвенно-грунтовых вод (и тем самым с разрывом капиллярного подтока) к концу зимы влажность этих слоев почвы бывает даже ниже максимальной капиллярной влагоемкости (март).

Теплооборот в почве, связанный с переходом воды в лед, вычисленный по среднемноголетним данным на 1 см<sup>2</sup> поверхности, составляет для слоя почвы 20 см  $\approx 900$  кал/см<sup>2</sup>, для всего замерза-

Вероятность (%) различных запасов продуктивной влаги в почве.  
Ст. Белогорка, озимое поле

Слой почвы (см)	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI
-----------------	----	---	----	-----	---	----	-----	----	---	----

Ниже наименьшей влагоемкости

0—20	27	0	0	0	0	0	0	0	21	73
0—50	13	0	0	0	0	0	0	0	28	67
50—100	8	8	0	0	0	0	0	0	0	11
0—100	8	0	0	0	0	0	0	0	20	70

Выше максимальной капиллярной влагоемкости

0—20	7	40	67	78	92	100	100	85	14	4
0—50	13	40	85	78	91	91	100	92	28	0
50—100	92	84	100	100	100	100	83	100	100	89
0—100	62	62	82	100	100	89	100	100	10	20

Выше полной влагоемкости

0—20	7	0	33	36	69	92	92	54	0	0
0—50	0	0	8	23	36	64	67	50	0	0
50—100	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
0—100	0	8	9	9	11	22	0	0	0	0

ющего слоя — более 1400 кал/см<sup>2</sup>. В отдельные же годы он превышает 2000 кал/см<sup>2</sup>.

Связь скорости промерзания почвы с метеорологическими условиями в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод представлена уравнением [198].

$$\Delta h_1 = -0,280H + 0,078 \sum t_1 + 0,002h_1 + 5,7. \quad (48)$$

В этом уравнении  $\Delta h_1$  — изменение глубины промерзания почвы за декаду (см),  $H$  — высота снежного покрова к началу декады (см),  $\sum t_1$  — сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха за декаду,  $h_1$  — глубина промерзания почвы к началу декады (см).

Как видим, в этих районах в процессе промерзания почвы, кроме температуры, большую роль играет высота снежного покрова. Так, если высота снежного покрова лишь 5 см, а среднесуточная температура воздуха — 6° С, то промерзание почвы увеличивается за декаду примерно на 10 см. Если же высота снежного покрова 40 см, то при той же температуре глубина промерзания почвы не увеличивается, а при еще более высоком снежном покрове начинается уже оттаивание почвы снизу.

Анализ динамики влажности и промерзания почвы в холодную часть года в ряде других пунктов с высоким залеганием почвенно-грунтовых вод и устойчивой зимой показывает, что характерный

для Белогорской агрометеостанции ритм изменений запасов почвенной влаги зимой присущ всем этим пунктам. В районах же, характеризующихся более высоким, чем в Белогорке, стоянием почвенно-грунтовых вод (Смоленск, Новгород, Псков, Минск и др.), зимнее влагонакопление достигает еще больших размеров, 100 мм и более. Поскольку это так, то можно считать, что описанный тип сильного влагонакопления зимой характерен для всей зоны высокого стояния почвенно-грунтовых вод.

Совсем иная картина зимнего влагонакопления наблюдается в районах, где почвенно-грунтовые воды залегают глубоко и где осенью запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое бывают ниже наименьшей влагоемкости, т. е. там, где перед замерзанием почвы легкоподвижная влага практически отсутствует. В табл. 23 представлена динамика влажности и промерзания почвы в 1944-45 г. на характерной для таких районов Безенчукской агрометеостанции (Заволжье, Куйбышевская область), когда влажность почвы была выше обычной, а изменение запасов влаги за зиму было наибольшим. Из данных этой таблицы следует, что даже в такой год увеличение запасов влаги в метровом слое почвы за зиму составило всего лишь 14 мм (январь), а в отдельных десятисантиметровых слоях не превысило 2—3 мм.

Таблица 23

Запасы продуктивной влаги (мм) в почве в 1944-45 г.  
на озимом поле. Ст. Безенчук

Слой почвы (см)	Перед нача- лом промер- зания (18 XI)	В период промерзания				В период оттаивания		В талой почве <sup>1</sup> (18 IV)	Изменение запасов влаги за период с 18 XI по 29 I
		29 XI	28 XII	29 I	27 II	28 III	8 IV		
0—10	16	15	14	16	16	20	16	16	0
10—20	16	15	14	16	15	15	16	17	0
20—30	18	19	17	18	16	17	19	22	0
30—40	11	12	10	13	11	13	12	11	+2
40—50	8	9	8	10	9	10	11	10	+2
50—60	10	9	9	12	10	9	10	8	+2
60—70	8	8	8	10	8	8	8	7	+2
70—80	10	11	11	13	11	9	11	6	+3
80—90	8	10	10	10	10	12	11	6	+2
90—100	8	10	10	9	10	11	10	5	+1
0—100	113	118	111	129	116	124	124	108	+14
Глубина промер- зания почвы (см) . . . . .	2	35	60	115	142	120	70	0	—
Глубина оттаива- ния почвы (см)	—	0	0	0	0	5	33	Пол- ностью оттаяла	—

<sup>1</sup> Убыль воды из нижних слоев почвы вызвана транспирацией растений.

Среднемноголетние запасы продуктивной влаги к концу месяца в холодную часть года в районах ненасыщенных почв, глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и устойчивой зимы. Ст. Безенчук

Слой почвы (см)	Влагоёмкость почвы в талом состоянии		Запасы влаги (мм)						Весна после снего- таяния	Изменение запасов влаги в период	
			осень		период устойчивого промерзания						
	наимень- шая	полная	IX	X	XI	XII	I	II	III	устойчивого промерзания (ноябрь— январь)	с марта до конца снеготаяния
Зябь											
0—20	43	113	11	15	22	22	25	23	23	+3	+15
0—50	94	237	22	31	46	46	50	43	42	+4	+51
50—100	90	201	5	9	10	15	13	10	10	+3	+31
0—100	184	438	27	40	56	61	63	53	52	+7	+82
Озимое поле											
0—20	43	113	14	19	27	27	27	27	25	0	+8
0—50	94	237	44	54	66	61	66	63	65	0	+19
50—100	90	201	39	44	44	46	49	49	48	+5	+9
0—100	184	438	83	98	110	107	115	112	113	+5	+28
Среднемного- летняя глубина промерзания почвы (см)					29	67	98	111	95		



По среднегодовым данным Безенчукской агрометеостанции, за период устойчивого промерзания в верхних слоях прибавка влаги не превышает 5 мм, а в метровом — 10 мм, т. е. влагозапасы практически остаются на том же уровне, что и в осенний период (табл. 24).

По данным за все годы наблюдений, существенного увеличения запасов влаги зимой в районе Безенчука не происходит. Влажность почвы всегда остается ниже наименьшей влагоемкости. На озимых полях около 30% лет запасы влаги в метровом слое почвы бывают ниже 50% наименьшей влагоемкости, а на полях, вышедших из-под яровых, количество лет с такими запасами в метровом слое почвы составляет 83%, в нижнем же полуметровом слое (50—100 см) — 100% (табл. 25).

Таблица 25

Вероятность (%) различных запасов продуктивной влаги в почве. Ст. Безенчук

Слой почвы (см)	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI
-----------------	----	---	----	-----	---	----	-----	----	---	----

Озимое поле

Наименьшая влагоемкость и выше

0—20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0—50	0	0	0	0	0	0	14 *	0	0	0
50—100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0—100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ниже 50% наименьшей влагоемкости

0—20	86	57	14	14	29	14	14	0 *	86	100
0—50	57	43	14	14	14	14	14	0 *	71	100
50—100	57	57	43	14	29	29	29	43	43	100
0—100	57	57	29	29	29	29	29	14	71	100

Зябь из-под яровой пшеницы

Наименьшая влагоемкость и выше

0—20	0	0	0	0	0	0	17 *	0	0	0
0—50	0	0	0	0	0	0	33 *	0	0	0
50—100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0—100	0	0	0	0	0	0	17 *	0	0	0

Ниже 50% наименьшей влагоемкости

0—20	67	67	33	33	17	33	17	0	67	100
0—50	83	83	50	50	33	50	33	0	50	83
50—100	100	100	100	83	100	83	83 *	83	50	83
0—100	100	83	83	83	83	67	67 *	0	33	67

Примечание. Звездочкой (\*) отмечены данные в период весеннего снеготаяния.

Условия для зимних передвижек влаги в почве в парообразном виде в районах ненасыщенных почв и глубокого стояния почвенно-грунтовых вод весьма благоприятны. Разность упругостей водяного пара по вертикальному профилю почвы, количество свободных от воды пор почвы и время, в течение которого происходят передвижки, здесь достигают высоких значений (табл. 26, рис. 22). Поскольку, несмотря на сказанное, ощутимых прибавок влаги в зимний период все же здесь нет, можно сделать вывод, что роль парообразного передвижения воды в обогащении почвы влагой зимой ничтожна и в этой зоне.

Таблица 26

Среднегоголетние максимумы отрицательных градиентов упругости водяного пара, рассчитанные на слой почвы толщиной 10 см, и длительность периода с отрицательными градиентами в почве. Ст. Безенчук

Слой почвы (см)	Градиент (мм)	Длительность периода (декады)
10—25	0,33	18
25—50	0,44	21
50—80	0,30	19
80—160	0,16	20
160—320	0,10	19

Несмотря на глубокое промерзание, теплооборот почвы, связанный с переходом воды в лед, в районе Безенчука значительно меньше, чем в Белогорке. Даже на наиболее богатом влагой озимом поле на замерзание продуктивной влаги в слое почвы 20 см он составляет всего лишь 220 кал/см<sup>2</sup> (по сравнению с 900 кал/см<sup>2</sup> в Белогорке), а во всем промерзающем слое 120 см 1100 кал/см<sup>2</sup> (по сравнению с 1400 кал/см<sup>2</sup> для слоя 50 см в Белогорке). В почвах зяблевых полей и занятых травами он еще меньше — около 200 кал/см<sup>2</sup> в верхнем слое 20 см и всего лишь около 500 кал/см<sup>2</sup> во всем промерзающем слое. Вследствие наблюдаемых низких температур на замерзание в почвах Безенчукской станции рыхло-связанной воды требуется около 25 кал/см<sup>2</sup> для верхнего слоя 20 см и около 240 кал/см<sup>2</sup> для всего замерзающего слоя.

Связь скорости промерзания почв с метеорологическими условиями имеет вид [198].

$$\Delta h_1 = -0,606H + 0,158 \sum t_1 - 0,083h_1 + 6,8. \quad (49)$$

Условные обозначения в этом уравнении те же, что и в уравнении (48). Сравнение их (48) и (49) показывает, что при одних и тех же метеорологических условиях в районах ненасыщенных почв и глубокого стояния уровня грунтовых вод почва промерзает примерно в два раза быстрее, чем в районах сильноувлажненных почв.

Причина этого заключается в указанных выше особенностях тепло- и влагооборота.

Отмеченные для района Безенчука особенности мерзлотного процесса свойственны всей той части степной зоны Европейской территории СССР, где почвы отличаются значительным недонасыщением влагой с осени, а климат характеризуется устойчивой зимой. Следует при этом отметить, что почвы Безенчука высоко окультурены и хозяйство там ведется на более высоком, чем обычно в этой зоне, уровне агротехники. Поэтому указанный тип мерзлотного процесса в пределах большей части степной зоны выражен еще более ярко, чем в Безенчуке. Особенно ярко этот тип выявлен в условиях сухой вечной мерзлоты. Иллюстрацией могут служить материалы наблюдений Покровской агрометеостанции, расположенной в 70 км от Якутска, в условиях слабоподзоленных легкосуглинистых почв, характеризующихся сильной недонасыщенностью влагой (табл. 27).

Таблица 27

Среднемноголетние запасы продуктивной влаги в районах вечной сухой мерзлоты на озимом поле. Покровская агрометеостанция, Якутская АССР

Слой почвы (см)	Наименьшая влаго- емкость почвы (мм) в талом состоянии	Запасы влаги (мм)										Изменение запасов влаги в период	
		осень		период промерзания надмерзлотного слоя почвы							весна после снеготаяния		
		VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV			
0—20	41	17	18	16	15	16	16	17	17	19	36	3	17
0—50	83	49	52	49	47	47	48	49	50	52	79	3	27
50—100	65	41	43	40	40	41	41	43	35	47	54	7	7
0—100	138	90	95	87	87	88	89	92	85	99	133	10	34

Из этих материалов следует, что и в условиях вечной, но сухой мерзлоты наблюдается то же ничтожное накопление влаги в почве в холодную часть года, как и в условиях ненасыщенных почв Европейской территории СССР. Следовательно, можно считать, что в природных условиях механизм парообразного передвижения не может обеспечить значительного обогащения почвы влагой за период ее сезонного промерзания и что увеличение запасов влаги в почве в холодную часть года практически происходит лишь путем передвижения воды в жидком виде.

Третий, переходный, тип зимнего влагонакопления свойствен зоне глубокого залегания грунтовых вод и неустойчивой зимы. Этот тип представлен многолетними наблюдениями агрометеостанции Синельниково Днепропетровской области. Основными климатическими особенностями района этой станции являются сильные

оттепели с частым сходом снежного покрова, а иногда и полным оттаиванием почвы зимой.

По осредненным данным, в Синельникове за период промерзания в верхнем двадцатисантиметровом слое почвы озимого поля, который уже осенью бывает насыщен до наименьшей влагоемкости, запасы влаги увеличиваются на 12 мм и достигают 140% этой величины. В метровом слое, запасы влаги которого осенью составляют 85% наименьшей влагоемкости, они за зиму увеличиваются на 14 мм, в результате чего зимой достигают величины наименьшей влагоемкости (табл. 28).

После уборки сельскохозяйственных культур на полях, сильно истощенных ими, увеличение запасов влаги существенно больше. За период промерзания на зяби из-под яровой пшеницы в слое 0—20 см, водные запасы которого равняются 85% наименьшей влагоемкости, увеличение составляет 17 мм, в слое 0—50 см, насыщенном осенью до 75%, 35 мм и в слое 0—100 см, запасы влаги в котором осенью составляют всего лишь 55% наименьшей влагоемкости, 42 мм. Несмотря на такое увеличение влаги, насыщения почвы до наименьшей влагоемкости на этих полях зимой все же не происходит. Оно отмечается лишь во время полного оттаивания, когда талые воды промачивают и глубокие слои почвы (табл. 29).

В отдельные годы изменение запасов влаги за период осень—зима бывает значительно больше. Так, в зиму 1934-35 г. после засушливой осени за время одной лишь оттепели, сопровождавшейся полным сходом снежного покрова и оттаиванием почвы, запасы влаги среди зимы увеличились на озимом поле на 34 мм, на зяби из-под яровой пшеницы — на 88 мм.

Количество замерзающей влаги в период устойчивого промерзания в районе Синельниково на озимом поле в слое 0—20 см, по многолетним данным, составляет в среднем 64 мм и во всем замерзающем слое — 110 мм.

Теплооборот почвы, связанный с переходом воды в лед и несенный к периоду устойчивого промерзания, исчисляется 960 кал/см<sup>2</sup>, причем около 500 кал/см<sup>2</sup> приходится на замерзание верхнего двадцатисантиметрового слоя почвы. В связи с многократными оттепелями, вызывающими частое подмерзание и оттаивание, фактический теплооборот, связанный с промерзанием почвы, существенно больше.

Связь скорости промерзания почвы с метеорологическими условиями в районах глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и неустойчивой зимы имеет примерно такой же характер, как и в зоне глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и устойчивой зимы, и может быть выражена тем же уравнением (49).

Данные Полтавской агрометеостанции (северная часть описываемых районов), проводившей специальные исследования динамики влажности почвы в зимнее время [233], показывают, что вследствие оттепелей, вызывающих избыточное увлажнение верхних слоев почвы, миграция влаги в районах с неустойчивой зимой может быть очень сильной, причем увеличение влаги в самых

Таблица 28

Среднегоголетние запасы продуктивной влаги к концу месяца в холодную часть года в районах полного весеннего промачивания, глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и неустойчивой зимы. Ст. Синельниково

Слой почвы (см)	Влажность почвы (мм) в талом состоянии		Запасы влаги (мм)						Изменение запасов влаги в период			
			осень		в период промерзания							
	наимень- шая	полная			IX	X	XI	XII	I	II	промерзания (XII—I)	с февраля до конца снеготаяния
Зябь												
0—20	46	94	22	29	40	55	60	67	+17	+5		
0—50	100	207	42	53	74	97	105	110	+36	+23		
50—100	79	155	21	27	27	42	40	46	+6	+2		
0—100	179	362	63	70	101	139	145	154	+42	+25		
Озимое поле												
0—20	46	94	30	32	47	52	54	64	+12	0		
0—50	100	207	72	74	91	100	100	114	+14	0		
50—100	79	155	58	58	62	64	64	64	0	+4		
0—100	179	362	130	132	153	164	164	178	+14	+4		
Среднегого- летняя глубина про- мерзания почвы (см)						33	42	49				

**Вероятность (%) различных запасов продуктивной влаги в почве.  
Ст. Синельниково**

Слой почвы (см)	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI
--------------------	----	---	----	-----	---	----	-----	----	---	----

**Озимое поле**

**Наименьшая влагоемкость и выше**

0—20	2	4	27	63	85	98	77	42	2	•
0—50	2	4	23	39	50	63	64	48	2	7
0—100	0	2	4	28	31	33	42	37	5	0

**Ниже 50% наименьшей влагоемкости**

0—20	23	27	10	6	7	0	0	5	62	82
0—50	10	14	4	0	0	0	0	2	54	84
0—100	6	2	0	0	0	0	0	2	30	76

**Зябь из-под яровой пшеницы**

**Наименьшая влагоемкость и выше**

0—20	2	2	12	46	74	82	82	43	2	2
0—50	2	7	5	33	55	69	74	50	9	5
0—100	0	0	0	5	14	30	39	32	7	3

**Ниже 50% наименьшей влагоемкости**

0—20	49	41	16	8	8	0	0	0	9	5
0—50	73	17	26	8	8	0	0	0	0	0
0—100	82	84	40	23	10	5	5	2	2	2

Примечание. Здесь и в последующих таблицах точка (•) означает вероятность менее 5%.

верхних слоев почвы сопровождается уменьшением ее в нижних. Граница резкого изменения влажности совпадает с глубиной промерзания почвы (табл. 30).

Следовательно, в зоне глубокого стояния грунтовых вод и неустойчивой зимы основным фактором, определяющим увеличение запасов почвенной влаги в течение зимы, является проникновение талых вод в почву. Но наряду с этим в верхних слоях почвы определенное значение может иметь и миграция влаги, причем она, как и в других районах, находится в определенной зависимости от степени увлажнения почвы, т. е. от наличия в ней того или иного количества легкоподвижной влаги.

Связь изменений запасов влаги за холодную часть года с метеорологическими условиями в районах глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и неустойчивой зимы выражена уравнением

$$\Delta W = 0,21m + 0,62\delta W - 33, \quad (50)$$

где  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги в метровом слое за холодную часть года,  $m$  — количество выпавших за это время осадков,  $\delta W$  — дефицит запасов продуктивной влаги в почве осенью. В этих районах решающее значение в обогащении почвы влагой в холодный период имеет дефицит влажности почвы осенью, но вместе с тем здесь заметно возрастает и роль количества выпавших осадков.

Таблица 30

Влажность почв в процентах веса абсолютно сухой почвы при промерзании. Полтавская агрометеостанция, яблечное поле, 7 I 1940 г., результаты 30 сопряженных определений

Слой почвы (см)	Глубина промерзания почвы (см)				
	5	10	15	20	25
0—2	48	36	36	37	32
5	44*	45	42	34	34
10	25	38*	40	37	34
15	25	23	31*	35	34
20	24	24	23	29*	27
25	24	23	22	22	26*
30	24	22	23	22	21

Примечание. Звездочкой (\*) отмечены границы мерзлоты и резкого изменения влажности почвы.

Описанные выше закономерности накопления влаги в корнеобитаемом слое почвы в холодную часть года в связи с процессом промерзания подтвердились лабораторными опытами, моделирующими природные условия [175]. В лабораторных опытах миграция влаги изучалась на промораживаемых образцах почвы с ненарушенным строением, характеризующихся весьма различным содержанием подвижной влаги. Были обеспечены следующие градации увлажнения: 1) близкое к максимальной гигроскопичности, 2) близкое к влажности устойчивого завядания, 3) соответствующее 30% НВ, 4) соответствующее наименьшей влагоемкости, 5) соответствующее максимальной капиллярной влагоемкости, 6) непрерывный капиллярный подток воды во время промораживания.

Опыт был организован таким образом, что подток холода осуществлялся лишь сверху, как это имеет место при замерзании почвы в естественных полевых условиях. Температура воздуха в холодильной камере поддерживалась на уровне  $-5^{\circ}\text{C}$ . Для наблюдений за процессом и временем промерзания в образцы почвы на разные глубины были вмонтированы термодатчики. Промораживание продолжалось до установления одинаковой температуры ( $-3,9, -4,0^{\circ}\text{C}$ ) на всех глубинах во всех образцах почвы (7 суток). Миграция влаги в почве определялась путем сопоставления послойного распределения влажности в образцах до и после промораживания. Определение количества замерзшей воды производи-

лось калориметрическим методом путем подсчета количества скрытой теплоты, поглощенной при таянии различно увлажненных образцов почвы.

Результаты опыта представлены в табл. 31 и на рис. 23. Из данных таблицы следует, что в образцах почвы, в которых не было легкоподвижной воды (т. е. с влажностью, соответствующей максимальной гигроскопичности, влажности устойчивого завядания и 30% НВ), в процессе промерзания миграция влаги практически отсутствовала. В образцах почвы, увлажненных до наименьшей влагоемкости, миграция влаги была ярко выражена: имело место

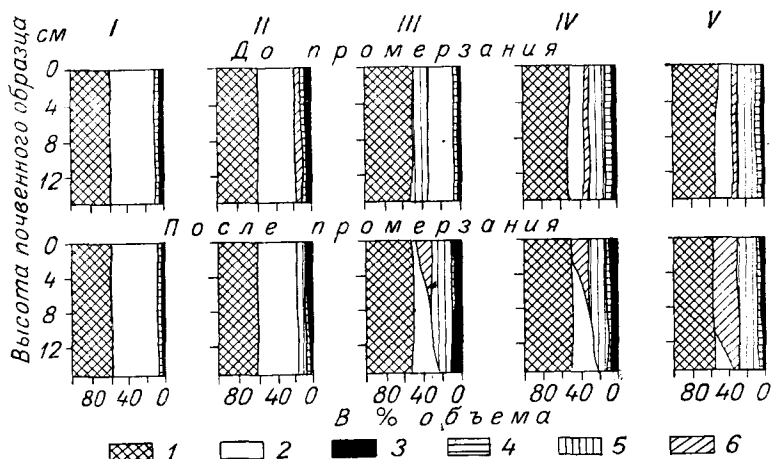


Рис 23. Миграция влаги в различно увлажненной почве (по данным лабораторных опытов).

Варианты увлажнения: I — влажность завядания, II — 30% НВ, III — наименьшая влагоемкость, IV — максимальная капиллярная влагоемкость, V — капиллярный подток воды во время промерзания; 1 — объем, занятый почвой, 2 — объем, занятый воздухом, 3 — объем, занятый прочносвязанной водой, 4 — объем, занятый рыхлосвязанной водой, 5 — объем, занятый водой открытых капилляров, 6 — объем, занятый водой закрытых капилляров и гравитационной водой.

значительное обогащение верхнего слоя за счет обезвоживания нижнего. Обезвоживание нижнего слоя при этом продолжалось до тех пор, пока влажность его не снизилась до 60—70% НВ, выраженной в миллиметрах продуктивной влаги. Примерно такое же явление наблюдалось и в капиллярно-насыщенной почве. В этом случае количество влаги, передвинувшейся снизу вверх, было больше, но влажность нижнего слоя почвы осталась на том же уровне, что и в предыдущем варианте: она равнялась 60—70% НВ.

При капиллярном подтоке воды извне (дно почвенного образца в течение всего периода промораживания было в контакте с зеркалом свободной воды) в процессе промерзания все слои почвы сильно обогатились водой. После промораживания влажность этого образца превысила полную влагоемкость почвы (103%).



## Миграция влаги в различно увлажненной почве в процентах веса абсолютно сухой почвы

Слой почвы (см)	Увлажнение почвы (мм) соответствующее					
	максималь- ной гигро- скопичности	влажности завядания	30% наимень- шей влаж- ности	наимень- шей влаж- ности	максималь- ной капиллярной влажности	при капиллярном подтоке воды снизу во время промерзания
До промерзания						
0—4	4,3	6,9	13,6	27,1	29,2	29,2
4—8	5,1	7,8	13,4	27,7	29,0	29,0
8—12	5,5	7,5	13,9	27,8	30,1	30,1
12—15	5,4	7,4	14,0	26,8	29,9	29,9
После промерзания						
0—4	4,2	6,8	13,5	37,8	42,0	46,7
4—8	5,2	7,8	13,7	27,4	31,0	46,4
8—12	5,4	7,8	13,6	21,6	22,8	46,4
12—15	5,5	7,5	13,8	20,1	20,1	36,8

На его поверхности была заметна изливающаяся вода, смерзшаяся в сплошной лед.

Судя по данным калориметрических определений, при температуре почвы  $-3,9$ ,  $-4,0^{\circ}\text{C}$  прочносвязанная вода (влажность почвы равна максимальной гигроскопичности и ниже) в лед не перешла. На оттаивание образцов почвы, имеющих влажность, близкую к влажности завядания, потребовалось примерно в 17 раз меньше тепла, чем на оттаивание образцов, насыщенных до наименьшей влагоемкости, и в 30 раз меньше, чем на оттаивание образцов почвы с капиллярным подтоком.

## Изменение запасов продуктивной влаги в теплую часть года

Одним из важнейших агрогидрологических процессов начала теплого периода является снеготаяние и освобождение полей от снежного покрова. Время обнажения почвы от снега, а следовательно, и начало оттаивания почвы с ее поверхности, поглощение почвой талых вод и расходование почвенной влаги на испарение зависят от погоды, влагозапасов в снеге, экспозиции и крутизны склонов. Влияние экспозиции особенно ярко проявляется при ясной погоде. В тех случаях, когда снег тает при пасмурной погоде, различия в интенсивности таяния на разных формах и элементах рельефа незначительны.

В степных районах с малыми влагозапасами в снежном покрове и неравномерным его залеганием, за счет дневных положительных

температур, первые проталины появляются еще до установления положительных среднесуточных температур, вначале на южных склонах. Ко времени накопления суммы положительных температур, равной  $10^{\circ}\text{C}$  (в будке), при снегозапасах в поле к началу таяния около 50 мм проталины составляют на северных склонах около 25% всей площади, на южных — около 60% [229].

Уже в ранневесенний период одновременно с пополнением запасов почвенной влаги за счет снеготаяния идет довольно интенсивное расходование ее на испарение с обнаженных от снега участков поля. В это время в связи с наличием мерзлоты в почве практически повсеместно в оттаявшем слое влага находится в капиллярно-подпертом состоянии. Поэтому испарение ее почти полностью определяется разностью упругости водяных паров прилегающего слоя воздуха и поверхности почвы и, благодаря темной ее окраске и шероховатости, существенно превышает испарение с открытой водной поверхности. Прямых количественных данных о расходах влаги на испарение с почвы в этот период нет и даже в самом первом приближении их трудно определить, поскольку этот процесс очень сложен и мало изучен. Небольшой штрих тех сложных явлений, которые происходят в почве в период ее таяния, могут дать проведенные под Москвой (в Немчиновке) авторами данной работы круглосуточные наблюдения весной 1948 г.

В ночь с 3 на 4 IV температура в будке опускалась до  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы — до  $-1,5^{\circ}\text{C}$  и в ночь с 12 на 13 IV в будке — до  $-0,7^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы — до  $-1,4^{\circ}\text{C}$ . В первом случае глубина оттаявшего слоя почвы в поле составляла (считая от поверхности) 10—15 см, во втором — 30—35 см; глубина ночного подмерзания почвы сверху соответственно была: 1—2 и 1—1,5 см.

Во время наблюдений погода была антициклонической. Поражали те резкие изменения, которые происходили в поле в течение суток. Днем, с нагревом почвы солнцем, все мелкие углубления и западинки в поле наполнялись водой, часть ее стекала по поверхности в виде мельчайших ручейков, оттаявший верхний слой почвы имел текучее состояние. Перед заходом солнца еще до наступления отрицательных температур вода в углублениях постепенно исчезала, мелела и пропадали ручейки, почва теряла свою текучесть, становилась плотной и проходимой. Во время заморозка, ранним утром, она казалась совсем просохшей, была вся пронизана длинными игольчатыми кристаллами льда, между которыми виднелись как бы отжатые, мелкозернистые на вид кусочки почвы. По полю можно было свободно ходить. Позднее, с подъемом солнца, в микропонижениях вновь образовывались лужицы воды, появлялись мелкие ручейки, почва сверху оттаивала, вновь переходила в текучее состояние, передвижение по полю становилось невозможным.

Инструментальное определение влажности почвы в течение суток показало, что в дневные часы весь оттаявший слой почвы практически был увлажнен одинаково, до 34—36%. В ночные же и в раннеутренние часы (до оттаивания) в верхних слоях почвы создавались резкие градиенты влажности. Вследствие миграции воды при

замерзании в ночь с 3 на 4 IV влажность самого верхнего подмерзшего слоя повысилась с 36 до 67%, а нижнего (у мерзлой подошвы) — с 34% до 41%. В ночь же с 12 на 13 IV, когда воды в поле стало уже меньше, в результате подтяжки воды к верхнему подмерзшему слою, влажность его за время заморозка увеличилась с 30 до 40%. В соответствии с переходом жидкой воды в лед и обратно происходили, конечно, и сильные изменения в теплообро- роте почвы. Из этих кратковременных и отрывочных наблюдений видно, как сложен процесс влагооборота почвы в ранневесенний период и как трудно количественно учесть роль испарения влаги в этом процессе.

Время полного оттаивания почвы определяется не только условиями погоды, но и количеством тепла, необходимого для таяния льда, накопившегося в почве в период ее промерзания, — теплообро- ротом, связанным с переходом воды в лед и обратно. В районах с сильным льдонакоплением (Белогорка) в промерзшем слое почвы количество тепла, необходимого для его таяния, очень велико. Как уже говорилось ранее, теплооборот, связанный с сезонным промерзанием почвы верхнего двадцатисантиметрового слоя, здесь составляет около 900 кал/см<sup>2</sup>, всего замерзающего слоя — 1400 кал/см<sup>2</sup>, а в отдельные годы даже больше 2000 кал/см<sup>2</sup>. В действительности же вследствие многократного подмерзания и оттаивания самых верхних слоев почвы ранней весной количество тепла, потребного на полное оттаивание, еще больше. В соответствии с этим процесс оттаивания почвы здесь сильно затяги- вается. По осредненным данным агрометеостанции Белогорка, медленное оттаивание почвы (1 см за декаду) начинается снизу с 3-й декады марта и затем переходит в более быстрое весеннее оттаивание. Таяние почвы сверху до освобождения ее от снежного покрова не наблюдается. Период весеннего оттаивания почвы в среднем продолжается 2 недели (от 7 до 22 IV), но в отдельные годы затягивается почти до месяца. Лишь в годы, характеризую- щиеся почти полным отсутствием промерзания почвы (1937-38), процесс оттаивания завершается очень быстро, в 4 дня. Оттаива- ние идет как сверху, так и снизу, смыкаясь в среднем на двадцати- сантиметровой глубине. В годы с глубоким промерзанием сезонная мерзлота почвы исчезает примерно на глубине 40 см.

Связь скорости оттаивания почвы с метеорологическими усло- виями в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвен- но-грунтовых вод представлена уравнением [198]

$$\Delta h_2 = 0,575 \sum t_2 + 0,125 h_2 + 3,0. \quad (51)$$

В этом уравнении  $\Delta h_2$  — изменение глубины оттаивания почвы за декаду (см),  $\sum t_2$  — сумма положительных среднесуточных темпера- тур воздуха за декаду,  $h_2$  — глубина оттаивания почвы сверху к началу декады (см).

Как видно, на процесс оттаивания почвы сверху после осво- бождения почвы от снежного покрова решающее влияние оказы-

вает интенсивность нарастания положительных температур: в уравнении (51) коэффициент у переменной  $\Sigma t_2$  составляет 0,575.

С оттаиванием почвы здесь избыток воды сбрасывается и запасы уменьшаются, приходя в соответствие с влагоемкостью почвы при данном уровне стояния почвенно-грунтовых вод. По данным Белогорской станции, среднемноголетнее уменьшение запасов влаги пахотного слоя составляет 51 мм, верхнего полуметрового — 87 мм, в нижнем слое 50—100 см, запасы влаги увеличиваются на 11 мм. Таким образом, в целом за время таяния метровый слой почвы теряет 76 мм влаги (см. табл. 21).

В зоне черноземных почв с глубоким стоянием почвенно-грунтовых вод и устойчивой зимой в связи со слабым влагонакоплением в период промерзания почвы и малым теплооборотом, обусловленным переходом воды в лед и обратно, количество тепла, потребного на оттаивание почвы, невелико. В этих районах оттаивание почвы проходит быстро.

Связь скорости оттаивания с метеорологическими факторами здесь имеет вид [198]

$$\Delta h_2 = 0,20 \Sigma t_2 - 0,175 h_2 + 24,0. \quad (52)$$

Условные обозначения те же, что и в уравнении (51).

Сравнение уравнений (51) и (52) показывает, что при одних и тех же метеорологических условиях в этих слабоувлажненных районах почва оттаивает примерно в два раза быстрее, чем в районах сильноувлажненных почв. Запасы влаги в период таяния здесь резко повышаются за счет поглощения талых вод (см. табл. 24). По средним многолетним данным, в метровом слое почвы прибавки влаги в зависимости от степени недонасыщенности почвы осенью колеблются от 28 (озимые поля) до 82 мм (зять). При одном и том же количестве влаги в снежном покрове чем суше почва с осени, тем полнее использование талых вод. Как правило, избыточного увлажнения почвы здесь не наблюдается, вернее оно бывает кратковременным и имеет место до тех пор, пока не исчезнет мерзлота в верхнем, наиболее насыщенном влагой с осени слое почвы.

Обработка массовых наблюдений сети гидрометеорологических станций над влажностью почвы в зоне ненасыщенных почв и глубокого стояния почвенно-грунтовых вод с устойчивой зимой позволила установить количественную связь между увеличением запасов влаги за холодную часть года с метеорологическими условиями и запасами влаги в почве перед началом зимы в этих районах. Связь выразилась уравнением

$$\Delta W = 0,115 m + 0,568 W - 20, \quad (53)$$

где  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы за период от установления отрицательных среднесуточных температур осенью до установления температуры  $5^\circ\text{C}$  весной (мм),  $m$  — количество осадков, выпавших за этот период (мм),  $\delta W$  — де-

фицит запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы осенью по сравнению с наименьшей влагоемкостью (мм). Это уравнение показывает, что решающее значение в увеличении запасов влаги к началу вегетационного периода имеет величина осеннего дефицита влаги в почве, поскольку именно этим фактором определяется интенсивность поглощения талых вод. Лучшее поглощение талых вод слабоувлажненной почвой обуславливается тем, что сухая почва имеет большую свободную от воды порозность и требует значительно меньше тепла на оттаивание, чем сильноувлажненная. Она быстрее переходит в талое состояние и приобретает значительно лучшую водопроницаемость по сравнению с влажной почвой, поры которой к этому времени еще бывают забиты льдом.

В районах глубокого стояния грунтовых вод и неустойчивой зимы (Синельниково) связь скорости оттаивания с метеорологическими факторами выражается уравнением

$$\Delta h_2 = 0,777 \sum t_2 + 1,111 h_2 - 2,1. \quad (54)$$

Условные обозначения в этом уравнении те же, что и в уравнении (51).

Как видим, вследствие слабого выхолаживания почвы в районах с неустойчивой зимой она оттаивает при меньших затратах тепла не только по сравнению с районами избыточного увлажнения, но и по сравнению с засушливыми районами, характеризующимися устойчивой и суровой зимой.

Увеличение запасов влаги в почве к началу вегетации (наступление температуры  $5^{\circ}\text{C}$ ) в районах глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и неустойчивой зимы выражено уравнением

$$\Delta W = 0,21m + 0,62\delta W - 33. \quad (55)$$

Условные обозначения в нем те же, что и в уравнении (53).

Обычно в этих районах во время полного оттаивания почва промачивается на глубину метрового слоя, запасы его достигают наименьшей влагоемкости, нередко влага просачивается глубже.

В ранний весенний период расходы на транспирацию практически отсутствуют: поля, поступающие под яровые, еще не засеяны, а озимые только начинают отрастать. Поэтому влага из корнеобитаемого слоя почвы расходуется за счет испарения с поверхности и просачивания под действием силы тяжести в нижележащие слои. Пока просачивающиеся талые воды опираются на водонепроницаемый мерзлый слой, потери на испарение с поверхности почвы очень велики, но они пополняются капиллярным поднятием, поэтому почва значительно переувлажнена. С исчезновением мерзлой подошвы в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод подпертая мерзлой прослойкой вода уходит вглубь. В районах же ненасыщенных почв по мере оттаивания избыток воды в верхних слоях почвы расходуется на насыщение нижележащих слабоувлажненных слоев, капиллярное поднятие ослабляется и становится недостаточным для того, чтобы компенсировать

ровать потерю влаги на испарение: почва начинает подсыхать сверху. В это время наблюдаются огромные градиенты влажности в пахотном слое почвы. Особенно ярко это проявляется в районах вечной мерзлоты (Покровская агрометеостанция), где одновременно с капиллярным подтоком влаги вверх к испаряющей поверхности под действием сил кристаллизации происходит оттягивание влаги вниз, к фронту вечной мерзлоты. В этих условиях просыхание пахотного слоя почвы протекает исключительно быстро. Еще до полного схода снежного покрова с полей на отдельных проталинах верхние слои пахотного горизонта подсыхают до воздушносухого состояния при наличии значительного количества влаги в более нижних его слоях. Вследствие этого в пахотном горизонте возникают огромные вертикальные градиенты влажности, достигающие 12—15% веса абсолютно сухой почвы (табл. 32). Быстрому высыханию почвы способствуют огромные градиенты температуры и упругости водяного пара поверхности почвы и прилегающего к ней воздуха, обусловленные резко континентальным климатом зоны вечной мерзлоты. Все это вместе взятое создает здесь огромную пестроту влажности почвы на сельскохозяйственных полях в самом начале теплого периода.

Таблица 32

Влажность почвы (%) в отдельных слоях пахотного горизонта 8 V 1940 г.,  
Покровская агрометеостанция (Якутская АССР)

Слой почвы (см)	Номер скважины		
	1	2	3
0—3	2,8	17,4	3,0
7—10	15,1	26,5	18,2
17—20	14,3	24,1	17,1

С началом вегетации сельскохозяйственных культур изменение запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы становится результатом совокупного взаимодействия почвы, растений и метеорологических условий, а в зоне высокого стояния грунтовых вод — и колебаний их уровня. С этого времени на величине расходов влаги из почвы начинает сказываться степень углубления и характер развития корневой системы и состояния надземной массы растений. В зоне высокого стояния грунтовых вод одновременно с этим происходит значительное изменение запасов почвенной влаги вследствие углубления верхней границы капиллярной каймы. Все это вместе взятое приводит к тому, что скорость расходования почвенной влаги в течение периода вегетации растений сильно меняется, причем в каждой зоне по-своему.

В районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод максимальное уменьшение запасов влаги наблюдается в начале вегетационного периода в основном вследствие изменения запасов верхнего пятидесятисантиметрового слоя в связи

**Среднегодовые запасы продуктивной влаги (мм) в период**

Слой почвы (см)	Влагоемкость почвы		VIII		IX			X			IV		
	наимень- шая	полная	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

**Зона дерново-подзолистых почв, районы с выходом зер**

0—20	75*	86	57	52	49	52	58	62	71	69	—	96	87
0—50	166*	192	125	121	117	121	128	134	147	148	—	205	194
50—100	146*	176	125	123	119	122	120	118	112	120	—	120	119
0—100	312*	368	250	244	246	243	250	252	259	268	—	325	313

**Зона дерново-подзолистых почв, районы с подъемом ка**

0—20	62*	84	39	39	43	52	54	54	56	59	—	—	63
0—50	129*	184	86	91	96	107	112	112	118	127	—	—	141
50—100	62*	118	75	75	—	—	81	—	—	80	—	—	65
0—100	191*	302	161	166	—	—	193	—	—	207	—	—	206

**Зона черноземных почв, районы с глубоким стоянием**

0—20	43	106	15	15	14	16	16	19	18	21	—	30	22
0—50	94	237	45	45	45	45	44	50	51	56	—	82	67
50—100	90	201	42	38	36	37	36	38	40	40	—	45	43
0—100	184	438	87	83	81	82	80	88	91	96	—	127	110

**Зона черноземных почв, районы с глубоким стоянием поч**

0—20	46	94	32	29	27	27	28	27	28	32	47	41	36
0—50	100	207	72	68	66	67	67	64	67	72	98	92	85
50—100	79	155	52	57	58	59	58	60	60	65	66	66	64
0—100	179	362	124	125	124	126	125	124	127	137	164	158	149

Примечание. В табл. 33 и 34 звездочкой (\*) отмечена максимальная

## вегетации озимых культур в районах с различным увлажнением

V			VI			VII			Изменение запасов влаги за период				
1	2	3	1	2	3	1	2	3	посев-пре- кращение вегетации	возобнове- ние вегета- ции — выход в трубку	выход в трубку — цветение	цветение — восковая спелость	возобнове- ние вегета- ции — восковая спелость

## кала почвенно-грунтовых вод в корнеобитаемый слой (Батищево)

75	63	55	48	41	42	34	35	38	8	—20	—32	—7	—59
173	150	136	122	110	100	83	89	95	13	—34	—38	—41	—113
121	122	111	108	109	103	111	105	100	—9	3	—33	16	—14
294	272	247	230	219	203	194	194	195	4	—31	—71	—25	—127

## пиллярной каймы в корнеобитаемый слой (Белогорка)

53	50	40	40	34	30	29	28	27	15	—13	—16	—6	—35
121	99	85	81	72	64	60	57	52	26	—42	—27	—15	—84
63	63	60	58	58	55	44	46	56	6	—14	—5	—12	—31
184	162	145	139	130	119	104	103	108	32	—56	—32	—27	—115

## почвенно-грунтовых вод и устойчивой зимой (Безенчук)

19	13	11	8	7	6	5	5	8	5	—11	—11	—3	—25
56	44	36	27	20	17	14	12	18	5	—26	—29	—15	—70
44	41	39	24	17	12	10	4	8	3	—1	—30	—20	—51
100	85	75	51	37	29	24	16	26	8	—27	—59	—35	—121

## венно-грунтовых вод и неустойчивой зимой (Синельниково)

27	24	17	16	14	9	9	13	16	5	—11	—20	—7	—38
66	60	40	34	28	21	17	21	26	5	—13	—51	—17	—81
60	49	48	37	33	22	20	16	16	6	—1	—27	—17	—45
126	109	88	71	61	43	37	37	42	11	—14	—78	—34	—126

капиллярная влагоемкость.



**Среднегодовое запасы продуктивной влаги (мм) в период вегетации**

Слой почвы (см)	Влагоемкость почвы		IV			V			VI		
	наимень- шая	полная	1	2	3	1	2	3	1	2	3

**Зона дерново-подзолистых почв, районы с выходом зеркала**

0—20	75*	86	—	—	—	75	65	58	57	49	42
0—50	166*	192	—	—	—	155	138	133	127	111	100
50—100	146*	176	—	—	—	134	131	119	112	123	111
0—100	312*	368	—	—	—	289	269	252	239	234	211

**Зона дерново-подзолистых почв, районы с подъемом**

0—20	62*	84	—	—	62	51	48	44	44	36	28
0—50	129*	184	—	—	133	—	—	98	—	84	70
50—100	62*	118	—	—	64	—	—	62	—	—	63
0—100	191*	302	—	—	197	—	—	160	—	—	133

**Зона черноземных почв, районы с глубоким стоянием**

0—20	43	106	—	29	24	22	20	18	12	9	8
0—50	94	237	—	84	73	66	59	55	37	27	24
50—100	90	201	—	51	51	49	49	47	45	35	29
0—100	184	438	—	135	124	115	108	102	82	62	53

**Зона черноземных почв, районы с глубоким стоянием**

0—20	46	94	50	44	41	36	31	23	18	17	10
0—50	100	207	105	98	91	83	74	59	43	33	23
50—100	79	155	56	58	62	61	60	56	51	39	32
0—100	179	362	161	156	153	144	134	115	94	72	55

с отпусканьем капиллярной каймы. В этой зоне за период вегетации озимых культур расходы влаги из слоя 0—50 см почти в три раза превышают расходы из слоя 50—100 см, за период же вегетации ранних яровых они превышают их почти в семь раз (табл. 33 и 34, ст. Белогорка). Такое же соотношение расходов влаги из верхних и нижних слоев присуще и районам избыточного увлажнения с выходом почвенно-грунтовых вод в корнеобитаемый слой (табл. 33 и 34, ст. Батищево).

В районах глубокого стояния грунтовых вод, где капиллярный подток отсутствует, наибольшее количество влаги расходуется путем транспирации. Расходы достигают максимальных значений в репродуктивный период, особенно в период выход в трубку—цветение, когда корневая система и надземная масса растений достигают максимальной мощности. В противоположной зоне высокого увлажнения здесь во вторую половину вегетационного периода расходы влаги из слоя 50—100 см в связи с проникновением туда корней растений равны либо даже несколько превышают расходы

## ранних яровых культур в районах с различным увлажнением

VII			VIII			Изменение запасов влаги за период			
1	2	3	1	2	3	посев— выход в трубку	выход в трубку— цветение	цветение— восковая спелость	посев— восковая спелость
почвенно-грунтовых вод в корнеобитаемый слой (Батищево)									
33	33	41	34	41	44	-22	-20	+8	-31
76	76	86	76	91	95	-36	-43	+15	-64
120	106	107	109	106	109	-17	-11	0	-28
196	182	193	185	197	204	-53	-54	+15	-92
капиллярной каймы в корнеобитаемый слой (Белогорка)									
27	27	29	28	26	31	-26	-9	-1	-36
—	60	53	—	54	68	-49	-24	-6	-79
—	—	52	—	50	50	0	-10	-2	-12
—	—	105	—	104	118	-49	-34	-8	-91
почвенно-грунтовых вод и устойчивой зимой (Безенчук)									
5	5	4	12	12	11	-6	-10	-3	-19
16	15	12	23	26	30	-18	-31	-11	-60
20	17	14	14	15	19	-4	-18	-15	-37
36	32	26	37	41	49	-22	-49	-26	-109
почвенно-грунтовых вод и неустойчивой зимой (Синельниково)									
7	9	13	13	19	18	-19	-14	-8	-41
15	19	23	23	34	34	-30	-41	-14	-85
22	18	18	18	17	19	+4	-21	-21	-38
37	37	41	41	51	53	-26	-62	-35	-123

влаги из верхнего пятидесятисантиметрового слоя (табл. 33 и 34, станции Синельниково, Безенчук).

Связь динамики запасов продуктивной влаги в почве с видом и состоянием произрастающей культуры особенно ярко проявляется в районах глубокого стояния почвенно-грунтовых вод, где она не маскируется капиллярной подачей воды снизу. Рисунок 24 показывает, что, по многолетним данным, в районах полного весеннего промачивания и глубокого стояния грунтовых вод (ст. Синельниково) в начале вегетационного периода, пока не начались расходы влаги на транспирацию, запасы влаги под всеми культурами и на чистом пару одинаковы и составляют 160—165 мм. В дальнейшем в связи с ростом культур они все более и более различаются. Так, к концу мая под озимыми, которые в это время находятся уже в фазе цветения и успевают израсходовать большое количество влаги на транспирацию, запасы составляют 90 мм; под ранними яровыми (пшеница), только вступившими в фазу трубки, они равны 115 мм; под поздними яровыми (кукуруза), находящи-

мися еще только в фазе всходов, запасы влаги равны 135 мм, а на пару 140 мм.

К концу июня, когда и ранние яровые успевают израсходовать большое количество влаги на транспирацию, различия в запасах влаги между озимыми и ранними яровыми несколько сглаживаются, но зато возрастают различия между озимыми и поздними яровыми, только что вступившими в это время в период максимального роста, а следовательно, и в период максимальных расходов влаги на транспирацию. В это время запасы влаги составляют под озимыми 43 мм, под ранними яровыми 55 мм и под поздними яровыми 118 мм. На чистом же пару они равны 139 мм, т. е. остаются на том же уровне, что и месяц назад.

В начале июля в связи с созреванием озимой пшеницы и резким уменьшением расходов влаги на транспирацию запасы влаги

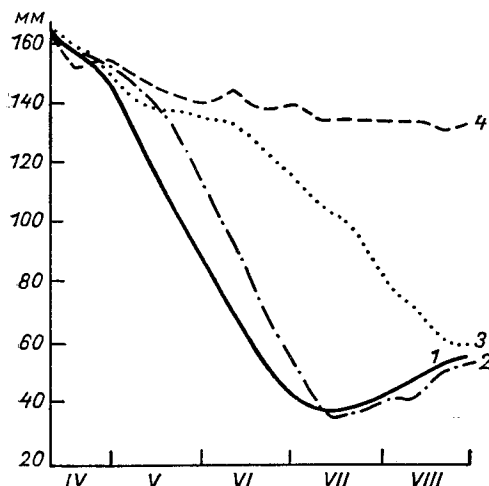


Рис. 24. Среднегголетние запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под различными культурами в зоне полного весеннего промачивания и глубокого стояния почвенно-грунтовых вод.

1 — озимая пшеница, 2 — яровая пшеница, 3 — кукуруза, 4 — черный пар.

на озимом поле начинают медленно увеличиваться. Через 10—15 дней в силу этих же причин происходит перегиб кривой влажности на поле с яровой пшеницей. Под кукурузой в соответствии со временем созревания затухание расходов влаги происходит почти на 2 месяца позже, чем под озимой пшеницей, и на 1,5 месяца позже по сравнению с яровой.

В результате отмеченных процессов к концу августа запасы влаги под различными культурами различаются всего лишь на 5 мм и составляют 54—59 мм. На паровом же поле и в этот период года они остаются высокими, 132 мм. Снижение запасов влаги на пару за весь теплый период года составляет около 30 мм и в основном происходит за счет подсыхания верхних слоев почвы, а также некоторого снижения его влагоемкости вследствие сезонного повышения температуры почвы.

В позднеосенний период в связи с понижением температуры и малыми расходами на испарение запасы влаги продолжают постепенно расти как на зяблевых полях, так и на бывших парах, заня-

тых теперь озимыми посевами. Такая закономерность в соотношении динамики запасов продуктивной влаги в почве под различными культурами в теплый период года имеет место во всей зоне черноземных почв, характеризующейся глубоким стоянием почвенно-грунтовых вод.

В зоне дерново-подзолистых почв, характеризующейся подъемом капиллярной каймы в корнеобитаемый слой и наличием верховодок, различия в запасах продуктивной влаги под отдельными культурами невелики. Они начинают обнаруживаться лишь летом, в период максимального роста сельскохозяйственных культур. Кривые влагозапасов под всеми культурами практически синхронны и недостаточно плавны даже в разрезе многолетних средних величин. Это позволяет думать, что в данной зоне на режиме запасов почвенной влаги корнеобитаемого слоя существенно сказывается положение капиллярной каймы и наличие верховодок.

Наибольшими запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы в этой зоне характеризуются чистые пары. Ко времени сева озимых запасы влаги на чистых парах составляют 180—190 мм, на 50—70 мм превышают запасы влаги на полях, занятых сельскохозяйственными культурами (рис.

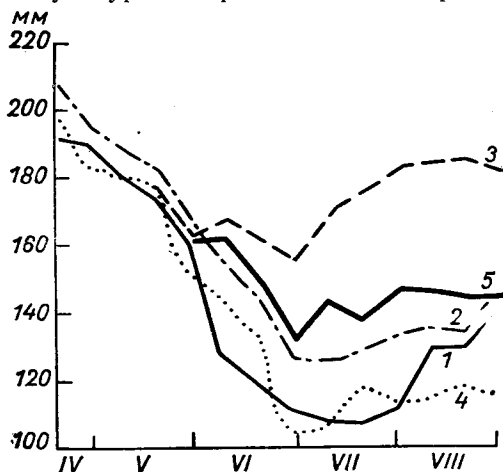


Рис. 25. Среднемноголетние запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под различными культурами в зоне дерново-подзолистых почв.

1 — озимая пшеница, 2 — яровая пшеница, 3 — чистый пар, 4 — клевер, 5 — картофель.

25). Наибольшее снижение влажности почвы в период вегетации посевов в зоне подзолистых почв отмечается на озимых и клеверных полях. Однако и на этих полях даже в период наибольшего расходования запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы держатся выше 100 мм, что, надо думать, объясняется капиллярным подтоком воды снизу. В позднеосенний период вследствие снижения температур и выпадения осадков влажность почвы на всех полях увеличивается и различия во влагозапасах между ними почти полностью сглаживаются.

Особенности изменения запасов почвенной влаги в летний период определяются тем, что в корнеобитаемом слое почвы пахотных угодий в подавляющей части СССР отсутствует легкоподвижная капиллярная влага. Вследствие этого влага в основном расходуется путем транспирации из тех слоев почвы, куда проникают корни растений. По мере углубления корней продуктивная влага

расходуется из все более и более глубоких слоев почвы. В отношении мощности почвенного слоя, из которого расходуется влага сельскохозяйственными культурами, установлено следующее.

Зерновые культуры, в частности яровая пшеница, в нечерноземной зоне имеют поверхностно расположенную и слабо развитую корневую систему, поэтому растения используют влагу в основном поверхностных слоев почвы (0—50 см). В зоне же черноземных почв благодаря глубокому проникновению корней яровые зерновые расходуют влагу из всего метрового слоя, озимые — из полуметрового, а кукуруза в южных районах с глубоким прогреванием почвы — даже из двухметрового слоя. Люцерна использует влагу до глубины 2—3 м и больше.

Картофель в нечерноземной зоне расходует влагу преимущественно из верхнего полуметрового слоя, клевер — из метрового, что наиболее ярко выражено в сухие годы, когда в связи с понижением уровня грунтовых вод верхний метровый слой слабо пополняется либо совсем не пополняется влагой из более глубоких горизонтов.

Расходы влаги на испарение с поверхности почвы в летний период на полях, занятых сельскохозяйственными культурами, со времени смыкания растительного покрова в соответствии с указанными выше причинами резко снижаются. Под зерновыми культурами в зависимости от их состояния и погодных условий они составляют примерно 40—70% суммарного испарения (эвапотранспирации), под пропашными (кукуруза) — 70—80%, а под хорошо развитыми травами — всего лишь 10—25% [99, 132, 232]. На паровых же полях пока не образовался верхний подсохший слой почвы, расходы влаги на испарение очень велики. С образованием сухого мульчирующего слоя испарение резко падает, а при достаточной его мощности даже в сухую и жаркую погоду практически отсутствует. Следует при этом отметить, что на паровых полях и на полях с сельскохозяйственными культурами до образования сомкнутого растительного покрова влага из верхних слоев почвы расходуется не только путем испарения в воздух, но и путем передвижения в более глубокие почвенные слои вследствие больших градиентов почвенных температур, а тем самым и больших градиентов упругости водяного пара.

В осенний период в связи с прекращением роста и созревaniem большинства культур расходы влаги на транспирацию резко снижаются, а после уборки культур прекращаются совсем. Расходы влаги на транспирацию вновь посеянных озимых культур также невелики, поскольку культуры находятся еще в начальных фазах развития.

Невелики в осенний период и расходы влаги на испарение с поверхности почвы, так как в это время температуры понижаются, повышается относительная влажность воздуха и на подавляющей части территории подвижная влага в почве отсутствует. Внутрипочвенное передвижение влаги в связи с охлаждением поверхностных слоев почвы осенью принимает обратное направление: влага идет

вверх. В результате выпадающие осадки не только компенсируют расходы почвенной влаги, но повсеместно пополняют запасы ее в верхних слоях почвы, а в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод также и в нижних горизонтах вследствие подъема уровня грунтовых вод.

Динамика запасов почвенной влаги в любой точке в первую очередь зависит от количества и распределения во времени выпадающих осадков, а также от температурного режима. Характер зависимости изменения запасов почвенной влаги от метеорологических условий существенно меняется как в пространстве, так и во времени, поскольку каждому месту в отдельные отрезки времени свойственны свои сочетания гидрогеологических условий, вида и состояния растений и характера почвы.

Из вышеизложенного следует, что характер зависимости изменений запасов продуктивной влаги от метеорологических условий очень сложен. Он различен для разных культур, непостоянен в течение периода их вегетации и отличается в различных почвенно-климатических зонах.

На современном уровне наших знаний не представляется возможным путем теоретических построений установить общую форму количественной зависимости изменений запасов продуктивной влаги от метеорологических условий. Установлены лишь связи на основе статистической обработки массовых (многотысячных) сопряженных полевых наблюдений над влажностью почвы, метеорологическими условиями и состоянием растений в основных почвенно-климатических зонах применительно к наиболее распространенным суглинистым почвам.

При статистической обработке материалов был использован метод множественной корреляции. В качестве переменных были приняты: а) температура воздуха, определяющая энергетические ресурсы испарения и темпы развития и роста растений, б) осадки — основной источник пополнения запасов влаги в почве, в) исходные запасы продуктивной влаги, определяющие доступность и подвижность почвенной влаги.

При установлении зависимостей изменения запасов почвенной влаги от метеорологических условий вся территория была подразделена на две различные по гидрогеологическим условиям и почвам части — зону черноземных и зону оподзоленных почв. Связи устанавливались для каждой культуры в отдельности с подразделением ее вегетационного периода на отрезки, более или менее однородные в отношении потребления и расходования запасов почвенной влаги [31, 33, 37].

Связи изменения запасов продуктивной влаги с принятыми в качестве переменных факторами оказались достаточно тесными, коэффициенты корреляции колебались в пределах 0,7—0,9 и в большинстве случаев превышали 0,8.

Общий вид выведенных уравнений регрессий таков:

$$\Delta W = at + bm + cW + l, \quad (56)$$

где  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги за декаду (мм),  $t$  — средняя за декаду температура воздуха,  $m$  — сумма осадков за декаду (мм),  $W$  — запасы продуктивной влаги к началу декады (мм),  $a, b, c, l$  — числовые параметры.

Следует обратить внимание на то, что вес отдельных переменных в выведенных уравнениях определяется не только численными коэффициентами при них, но и встречающимися в природных условиях абсолютными величинами самих переменных. Так, колебания переменной  $t$  в пределах выделенных отрезков вегетационного периода сельскохозяйственных культур обычно не превышают  $10^\circ\text{C}$ ; переменная  $m$  обычно колеблется от 0 до 30 мм и в отдельных редких случаях достигает 100 мм; переменная  $W$  в зоне черноземных почв в пахотном слое (0—20 см) колеблется от 0 до 50 мм, в метровом — от 0 до 200 мм; в зоне оподзоленных почв в пахотном горизонте — от 0 до 80 мм, в метровом слое на суглинистых почвах — от 60 до 300 мм, на песчаных — от 20 до 200 мм.

При установлении зависимости изменения запасов продуктивной влаги от метеорологических условий под озимыми зерновыми культурами вегетационный период озимых был разбит на четыре части: осенняя вегетация (посев—прекращение вегетации), весенняя вегетация (возобновление роста—выход в трубку), формирование колоса и цветка (выход в трубку—цветение) и формирование зерна (цветение—восковая спелость).

В табл. 35 даны установленные значения параметров  $a, b, c, l$ , уравнения (56) для определения величин изменения запасов влаги под озимыми зерновыми в основные отрезки времени их вегетации.

Анализ уравнения (56) и данных табл. 35 показывает, что изменение запасов продуктивной влаги в первую очередь определяется количеством выпавших осадков (переменная  $m$ ) и начальными запасами влаги (переменная  $W$ ). Коэффициенты у переменной  $m$  всегда имеют положительный знак, т. е. с увеличением осадков увеличиваются запасы влаги в почве. Коэффициенты у переменной  $W$  всегда имеют отрицательный знак — во всех случаях расходы растут с увеличением запасов влаги.

Поскольку уравнения связи выведены для отдельных периодов вегетации, которые значительно отличаются друг от друга по уровню температур, но в границах которых температуры колеблются незначительно, то переменная  $t$  (температура воздуха) в изменении запасов влаги играет меньшую роль, чем  $m$  и  $W$ . Во все периоды вегетации, за исключением периода выход в трубку — цветение в черноземной зоне, коэффициент при температуре имеет отрицательный знак (с повышением температуры расходы увеличиваются). В период же выход в трубку — цветение озимых в черноземной зоне этот коэффициент положителен, хотя по абсолютному значению он ничтожно мал (0,05). Объясняется это, очевидно, тем, что наблюдаемые здесь в это время высокие температуры угнетающе действуют на растения и тем самым вызывают уменьшение расходов влаги на транспирацию.

Значения параметров в уравнении  $\Delta W = at + bm + cW + l$   
для озимых культур [31, 33]

Периоды вегетации	Слой почвы (см)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>l</i>
-------------------	-----------------	----------	----------	----------	----------

Зона черноземных почв

Посев—прекращение вегетации . . . . .	0—20	—0,19	+0,44	—0,22	+1,6
	0—100	—0,05	+0,79	—0,025	—5,8
Отрастание—выход в трубку	0—20	—0,70	+0,26	—0,25	+7,4
	0—100	—1,12	+0,74	—0,233	+27,7
Выход в трубку—цветение	0—100	+0,05	+0,90	—0,070	—26,7
Цветение—восковая спелость	0—100	—0,64	+0,49	—0,201	+7,4

Зона оподзоленных почв

Посев—прекращение вегетации . . . . .	0—20	—0,23	+0,53	—0,24	+3,6
	0—100	—1,18	+0,80	—0,06	+9,3
Отрастание—выход в трубку	0—20	—0,33	+0,05	—0,424	+17,0
	0—100	—2,26	+0,46	—0,214	+41,6
Выход в трубку—цветение	0—100	—0,73	+1,10	—0,095	—11,4
Цветение—восковая спелость	0—100	—0,32	+0,80	—0,035	—15,4

Расчеты изменений запасов продуктивной влаги в почве под озимыми зерновыми культурами, произведенные по уравнению (56) с использованием данных табл. 35 и многолетних средних величин метеорологических элементов, позволяют сделать следующие выводы.

На озимых полях черноземной зоны при типичных для этой зоны условиях погоды запасы продуктивной влаги в почве расходуются быстрее, чем на полях нечерноземной зоны в типичных для нее метеорологических условиях. Лишь весной в период отрастания — выход в трубку, наоборот, запасы влаги в нечерноземной зоне уменьшаются быстрее, что является следствием углубления капиллярной каймы. Более быстрое уменьшение запасов почвенной влаги в нечерноземной зоне наблюдается и в другие периоды вегетации озимых в тех случаях, когда длительное время удерживается бездождная теплая погода.

При установлении зависимостей изменения запасов почвенной влаги от метеорологических условий под яровыми зерновыми культурами вегетационный период яровых был разбит на три части: формирование всходов и листьев (посев — выход в трубку), формирование колоса и цветка (выход в трубку — цветение) и формирование зерна (цветение — восковая спелость). Полученные значения параметров для уравнения связи представлены в табл. 36.



Значения параметров в уравнении  $\Delta W = at + bm + cW + l$   
для яровых зерновых культур [31, 33]

Периоды вегетации	Слой почвы (см)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>l</i>
Зона черноземных почв					
Посев—выход в трубку . . .	0—20	—0,10	+0,35	—0,28	+0,9
	0—100	—0,27	+0,78	—0,127	+2,0
Выход в трубку—цветение	0—100	+0,07	+0,93	—0,176	—20,6
Цветение—восковая спелость	0—100	—1,72	+1,08	—0,229	+23,3
Зона оподзоленных почв					
Посев—выход в трубку . . .	0—20	—0,54	+0,22	—0,199	+7,6
	0—100	+0,40	+1,24	—0,314	+2,5
Выход в трубку—цветение	0—100	—1,53	+0,51	—0,128	+17,7
Цветение—восковая спелость	0—100	—0,93	+0,64	—0,090	+10,8

Анализ данных табл. 36 показывает, что в уравнении, характеризующем закономерности изменения запасов влаги под яровыми зерновыми культурами в период выход в трубку—цветение в черноземной зоне, коэффициент *a* (так же, как и для озимых культур) имеет положительный знак. Очевидно, это объясняется той же причиной, о которой говорилось выше: увяданием растений и снижением их транспирации при высоких температурах и низкой влажности почвы.

В уравнениях, характеризующих изменение запасов влаги под яровыми зерновыми культурами в зоне оподзоленных почв, положительный знак у коэффициента *a* имеет место в уравнении, относящемся к периоду посев—выход в трубку для слоя почвы 0—100 см. Объясняется это тем, что в это время на яровых полях, имеющих рыхлую и еще не затененную поверхность, при теплой сухой погоде образуется слой мульчи, защищающий почву от потерь влаги на испарение. Кроме того, в этот период не успевает расходоваться влага, поступающая путем капиллярного подтока снизу, в это время еще довольно сильного, вследствие неглубокого и слабого развития корневой системы и малой транспирирующей поверхности надземной части растений. Этими же причинами можно объяснить и то, что в этом уравнении коэффициент *b* больше единицы.

Травы, как и все многолетние культуры, расходуют влагу в течение всего теплого периода года (примерно со времени перехода средней суточной температуры через 5°С весной и до перехода ее через 5°С осенью), однако с различной интенсивностью в разные отрезки этого периода.

Параметры уравнения изменения запасов продуктивной влаги под многолетними травами установлены на основе массовых сопряженных наблюдений сети гидрометеорологических станций для люцерны в зоне черноземных почв, для клевера — в зоне оподзоленных почв (табл. 37).

Таблица 37

Значения параметров в уравнении  $\Delta W = at + bt + cW + l$   
для многолетних трав [132]

Период вегетации	Слой почвы (см)	a	b	c	l
Люцерна					
Ранневесенний . . . . .	0—100	—1,8	+0,70	—0,06	+4,0
Наращение массы					
первого укоса . . . . .	0—100	—1,0	+1,06	—0,10	—5,8
второго укоса . . . . .	0—100	—0,6	+0,73	—0,21	+5,3
После второго укоса . . . . .	0—100	—1,1	+0,83	—0,16	+11,7
Клевер красный					
Отрастание — первый укос	0—100	—1,5	+0,72	—0,16	+27,1
Первый укос — прекращение вегетации . . . . .	0—100	—0,8	+0,72	—0,11	+11,5

Периоды, для которых получены уравнения связи, определялись интенсивностью нарастания зеленой массы трав и временем их укоса. Для люцерны выделено четыре периода: ранневесенний (от начала вегетации до установления среднесуточной температуры воздуха выше 15°С), нарастание массы первого укоса (от даты установления температуры 15°С до времени первого укоса), нарастание массы второго укоса, после второго укоса (до прекращения вегетации осенью). Для клевера выделено два периода: отрастание — первый укос, первый укос — прекращение вегетации.

Сопоставление данных, приведенных в табл. 35 и 37, показывает, что расходование запасов почвенной влаги многолетними травами из всего метрового слоя происходит значительно быстрее, чем зерновыми культурами, и период расходования намного длиннее.

Параметры уравнения изменения запасов продуктивной влаги под картофелем получены на основании массовых сопряженных наблюдений сети гидрометеорологических станций на основной территории возделывания этой культуры в нечерноземной зоне. Период вегетации картофеля был разбит на четыре части: посев — всходы, всходы — образование боковых побегов, образование боковых побегов — цветение, цветение — увядание (табл. 38).

Значения параметров в уравнении  $\Delta W = at + bm + cW + l$   
для картофеля [132]

Период вегетации	Слой почвы (см)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>l</i>
Посев — всходы . . . . .	0—20	+0,01	+0,24	-0,42	+6,5
	0—50	-0,21	+0,34	-0,29	+14,6
	0—100	+0,22	+0,56	-0,18	+5,0
Всходы — образование боковых побегов . . . . .	0—20	-0,26	+0,24	-0,45	+8,5
	0—50	-0,45	+0,45	-0,21	+5,6
	0—100	-0,38	+0,88	-0,02	-12,5
Образование боковых побегов — цветение . . . . .	0—20	-0,24	+0,40	-0,84	+2,4
	0—50	-0,26	+0,75	-0,24	-2,3
	0—100	-0,58	+0,57	-0,23	+14,3
Цветение — увядание . . . . .	0—20	-0,62	+0,31	-0,37	+11,9
	0—50	-0,85	+0,54	-0,24	+14,3
	0—100	-0,94	+0,72	-0,10	+7,8

Анализ табл. 38 показывает, что в течение вегетационного периода влага на полях, занятых картофелем, расходуется преимущественно из слоя почвы 0—50 см. Расходы влаги из метрового слоя мало отличаются от расходов из верхнего полуметрового.

Установление зависимостей изменения запасов почвенной влаги от метеорологических условий под кукурузой впервые было выполнено по материалам экспедиционных исследований Центрального института прогнозов и наблюдений ограниченной сети гидрометеостанций. При проведении экспедиционных исследований в степных районах Казахстана (Целиноградская область) влажность почвы определялась под среднепозднеспелыми сортами и гибридами кукурузы, выращиваемыми на силос (табл. 39).

Поскольку в климатических условиях степной части Северного Казахстана среднепозднеспелые сорта кукурузы ко времени наступления заморозков достигали лишь фазы появления нитей, установить зависимости изменений запасов влаги в почве в более поздние периоды по имеющимся экспериментальным данным не представилось возможным. Вследствие той же ограниченности материалов не представилось возможным выявить влияние исходного увлажнения почвы  $W$  на изменение запасов влаги в слоях 0—20 и 0—50 см в первую половину периода вегетации кукурузы (табл. 39). Последнее обусловлено тем, что влажность почвы при этих исследованиях колебалась в небольших пределах.

В связи с широким использованием уравнений связи в оперативной работе в целях ускорения расчетов С. А. Вериге [37] было предложено вместо изменений запасов влаги за декаду сразу рассчитывать конечную их величину, т. е. вместо формулы (56) ис-

Значения параметров в уравнении  $\Delta W = at + bm + cW + l$  для кукурузы [126]

Период вегетации	Слой почвы (см)	$a$	$b$	$c$	$l$
Посев — выход в трубку . . .	0—20	—0,33	+0,50	—	—0,2
	0—50	—0,92	+1,09	—	+4,3
	0—100	—0,43	+1,29	—0,08	+1,4
Выход в трубку — выметывание султана . . . . .	0—50	—2,02	+0,72	—	+24,2
	0—100	—0,80	+1,15	—0,10	+5,0
Выметывание султана — появление нитей . . . . .	0—50	—1,89	+0,40	—	+24,8
	0—100	—0,40	+0,95	—0,09	—8,0

пользовать формулу (57) с соответствующим пересчетом параметров

$$W_k = a W_n + bm + ct + l, \quad (57)$$

где  $W_k$  и  $W_n$  — запасы продуктивной влаги к концу и началу декады (мм),  $m$  — осадки за декаду (мм),  $t$  — средняя за декаду температура воздуха.

В дальнейшем этот вид уравнения был применен для установления связей между запасами продуктивной влаги в почве и метеорологическими условиями по ряду культур.

Так, Ю. И. Чирков [244] уравнения регрессии такого вида установил для кукурузы почти для всего периода ее развития (кроме молочно-восковой спелости) и почти для всех районов ее возделывания на Европейской территории СССР (табл. 40).

Е. С. Уланова [228] получила уравнения по кукурузе для Украины, но уже для всего периода вегетации этой культуры и в разрезе двух почвенных слоев 0—20 и 0—100 см (табл. 41).

Среднеазиатским гидрометеорологическим научно-исследовательским институтом [1] уравнения такого рода установлены для влагозапасов под хлопчатником при возделывании его в Узбекской и Таджикской ССР, где почвенно-грунтовые воды залегают глубоко и метровый слой почвы находится вне их воздействия, и в Туркменской ССР, где в период поливов грунтовые воды поднимаются и вне их воздействия остается лишь самый верхний слой 0—50 см. Для Узбекской и Таджикской ССР уравнения регрессии установлены для всего метрового слоя, для Туркменской ССР — только лишь для слоя 0—50 см. В связи с малым, можно даже сказать с полным отсутствием осадков, для территории Туркменской ССР начиная с фазы бутонизации эта переменная в уравнение не вводилась, для территорий же Узбекской и Таджикской ССР по той же причине она не вводилась начиная с фазы цветения (табл. 42).

Л. В. Андриановой аналогичные связи между запасами продуктивной влаги в почве и метеорологическими условиями для зоны

Значения параметров в уравнении  $W_k = aW_n + bm + ct + l$  для кукурузы [244]

Зона	Период вегетации	Слой почвы (см)	a	b	c	l	R	Ошибка уравнения
Украинская ССР	Всходы — 10-й лист	0—20	+0,69	+0,22	-0,79	+19,1	0,78	6
	10-й лист — выметывание султана	0—50	+0,83	+0,34	-0,15	+6,0	0,87	11
	То же	0—20	+0,62	+0,34	-1,56	+35,2	0,87	6
	Выметывание — молочная спелость	0—50	+0,73	+0,56	-2,55	+55,8	0,91	9
	То же	0—50	+0,72	+0,65	-1,65	+29,9	0,93	12
Северный Кавказ	Всходы — 10-й лист	0—100	+0,84	+0,78	-1,05	+28,9	0,94	17
	10-й лист — выметывание султана	0—20	+0,64	+0,15	-0,43	+14,6	0,82	6
	То же	0—50	+1,06	+0,35	-0,46	+6,3	0,90	11
	Выметывание — молочная спелость	0—50	+0,77	+0,36	-0,35	+5,3	0,87	12
	То же	0—50	+0,64	+0,38	-0,73	+18,4	0,83	13
Центрально-черноземные области	Всходы — 10-й лист	0—100	+0,80	+0,50	-2,55	+54,8	0,91	19
	10-й лист — выметывание султана	0—20	+0,75	+0,12	-0,28	+18,0	0,84	6
	То же	0—50	+0,77	+0,50	-1,19	+21,6	0,88	13
	Выметывание — молочная спелость	0—100	+0,83	+0,48	-2,46	+43,9	0,91	15
	То же	0—100	+0,83	+0,48	-2,46	+43,9	0,91	15
Центрально-черноземные области	Всходы — 10-й лист	0—20	+0,62	+0,22	-0,84	+22,9	0,94	4
	10-й лист — выметывание султана	0—20	+0,73	+0,35	-0,21	+1,9	0,85	5
	То же	0—50	+0,90	+0,30	-0,38	-2,3	0,94	11
	Выметывание — молочная спелость	0—50	+0,72	+0,68	-1,54	+20,4	0,84	17
	То же	0—100	+0,93	+0,80	-0,15	-14,8	0,92	22

Таблица 41

Значения параметров в уравнении  $W_n = aW_n + bm + ct + l$  для кукурузы [228]

Период вегетации	Слой почвы (см)	a	b	c	l	R	Ошибка уравнения
Посев — всходы . . . . .	0—20	+0,86	+0,25	-0,27	+2,5	0,85	5
1-я и 2-я декады после всходов . . . . .	0—20	+0,73	+0,16	-0,31	+6,0	0,82	5
3-я и 4-я декады после всходов . . . . .	0—20	+0,65	+0,24	-0,46	+12,0	0,89	6
То же . . . . .	0—100	+0,74	+0,80	-1,51	+34,8	0,93	16
5-я декада после всходов — выметывание султана . . . . .	0—20	+0,35	+0,29	-0,14	+8,4	0,87	6
То же . . . . .	0—100	+0,78	+0,59	-1,78	+38,3	0,95	11
Выметывание султана — молочная спелость . .	0—20	+0,52	+0,28	-0,56	+12,6	0,86	5
То же . . . . .	0—100	+0,74	+0,57	-3,06	+60,0	0,94	11
Молочная спелость — полная спелость . . .	0—20	+0,48	+0,30	-0,68	+14,1	0,79	6
То же . . . . .	0—100	+0,76	+0,62	-0,66	+9,0	0,80	16

Таблица 42

Значение параметров в уравнении  $W_n = aW_n + bm + ct + l$  для хлопчатника [1]

Период вегетации	Слой почвы (см)	a	b	c	l	R	Ошибка уравнения (мм)
Узбекская и Таджикская ССР							
Посев — бутонизация	0—50	+0,68	+0,37	-0,11	+35,6	0,80	7
	0—100	+0,76	+0,09	-0,11	+48,2	0,84	12
Бутонизация — цветение	0—50	+0,93	+0,38	-0,04	-2,3	0,88	9
	0—100	+0,84	+0,47	-0,08	+18,0	0,94	12
Цветение — раскрытие первых коробочек . . .	0—100	+0,84	—	-0,05	-3,9	0,91	15
Раскрытие первых коробочек — губительный заморозок . . . . .	0—100	+0,86	—	-0,08	+9,1	0,95	15
Туркменская ССР							
Посев — бутонизация . .	0—50	+0,96	+0,36	-0,03	-7,9	0,90	11
Бутонизация — цветение	0—50	+0,77	—	-0,07	+25,0	0,84	12
Цветение — раскрытие первых коробочек . . .	0—50	+0,90	—	-0,08	+4,2	0,83	15
Раскрытие первых коробочек — губительный заморозок . . . . .	0—50	+0,74	—	-0,12	+21,8	0,76	13

достаточного и избыточного увлажнения установлены для льна. Из-за подпитывания нижних слоев грунтовыми водами зависимости установлены для слоев 0—20 и 0—50 см (табл. 43).

Таблица 43

Значения параметров в уравнении  $W_k = aW_n + bm + ct + l$  для льна-долгунца [12]

Период вегетации	Слой почвы (см)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>l</i>	<i>R</i>	Ошибка уравнения
Всходы — начало образования соцветий . . . . .	0—20	+0,81	+0,20	—0,75	+11,7	0,87	6
То же . . . . .	0—50	+0,91	+0,36	—0,78	+6,3	0,86	10
Начало образования соцветий — конец цветения . . . . .	0—20	+0,66	+0,36	—1,10	+17,7	0,89	8
То же . . . . .	0—50	+0,78	+0,42	—2,26	+35,4	0,91	13
Конец цветения — ранняя желтая спелость	0—50	+0,87	+0,58	—1,14	—11,0	0,90	10

Все уравнения, количественно характеризующие закономерности изменения запасов влаги в почве под влиянием метеорологических условий, как уже ранее говорилось, получены статистическим методом. Поэтому применение этих уравнений при расчетах ограничивается условиями получения исходных материалов и дает осредненное и (ввиду ограниченного количества учитываемых факторов) лишь приближенное решение. Однако благодаря большому охвату конкретных условий, а также многочисленности и сопряженности наблюдений, положенных в основу данных связей, они могут быть широко использованы для расчетов.

Проверка применимости приведенных выше уравнений связи на независимом материале показала, что расхождение между рассчитанными по этим уравнениям величинами запасов продуктивной влаги в почве и фактически наблюдаемыми в 80%, а нередко и в 90% случаев не превышает 20% фактической величины.

Так как в число переменных, включенных в уравнения, введены запасы продуктивной влаги в почве к началу расчетного периода, суммирующие воздействие метеорологических условий предшествующего периода, воздействие почвенных, гидрогеологических и других особенностей местности, а также вида и состояния возделываемой культуры, то вышеприведенные уравнения могут быть использованы не только для характеристики типичных территорий, но и для расчетов динамики запасов продуктивной влаги в отдельных районах, хозяйствах и полях.

### Типы годового хода запасов продуктивной влаги в почве

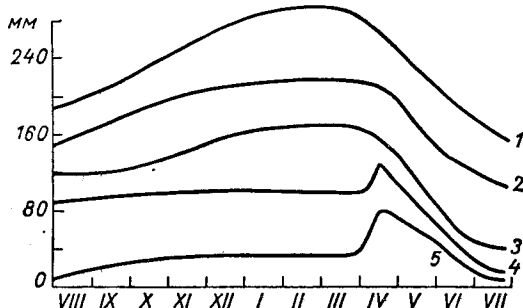
На основе многолетних массовых наблюдений над влажностью почвы в различных почвенно-климатических зонах, закономерностей формирования запасов влаги в почве и зависимостей скорости

расходования почвенной влаги от условий погоды могут быть выделены четыре основных типа годового хода запасов продуктивной влаги [31, 32].

**Тип обводнения** (рис. 26, кривая 1) свойствен районам с высоким стоянием грунтовых вод, где в момент максимальной высоты их стояния водное зеркало входит в почвенную толщу, а иногда даже достигает поверхности почвы. Верхняя граница капиллярной каймы отрывается от поверхности лишь на 2—3 летних месяца и даже на супесчаных почвах не уходит глубже 50 см. В связи

Рис. 26. Типы годового хода запасов продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под озимыми культурами, посеянными по чистому пару.

Типы: 1 — обводнения, 2 — капиллярного увлажнения, 3 — полного весеннего промачивания, 4 — слабого весеннего промачивания (засушливые районы), 5 — слабого весеннего промачивания (сильно засушливые районы).



с этим в корнеобитаемом слое почвы в течение всего года имеется большое количество легкоподвижной влаги.

Зимой в мерзлом слое почвы идет огромное влагонакопление за счет подтягивания легкоподвижной влаги из грунтовых вод. По многолетним данным, средний годовой максимум запасов продуктивной влаги приближается к 300 мм, он наблюдается в конце зимы и нередко превышает полную влагоемкость почвы. Весной с оттаиванием почвы избыток влаги сбрасывается. Весенние запасы становятся равными влагоемкости почвы при данном уровне залегания грунтовых вод и колеблются около 250 мм (слой 0—100 см).

В теплую часть года до тех пор, пока верхняя граница капиллярной каймы не оторвется от дневной поверхности, потери на испарение и транспирацию компенсируются капиллярным поднятием и запасы влаги изменяются очень медленно. Как только капиллярная кайма начнет углубляться, соответственно изменению влагоемкости почвы, наблюдаются резкие потери влаги вследствие передвижения ее вниз под влиянием силы тяжести.

Годовой минимум запасов влаги в верхнем слое почвы (0—50 см) опускается ниже его наименьшей влагоемкости, в более глубоком слое (50—100 см) он соответствует влагосодержанию капиллярной каймы. Во всем метровом слое даже супесчаных почв годовой минимум не опускается ниже 150 мм продуктивной влаги.

**Тип капиллярного увлажнения** (рис. 26, кривая 2) наблюдается там, где грунтовые воды достигают корнеобитаемого слоя почвы лишь в моменты наивысшего стояния, а верхняя граница капиллярной каймы в подавляющем большинстве случаев в течение всего года залегает в корнеобитаемом слое и лишь в отдельные моменты выходит на дневную поверхность



Зимний режим и годовой максимум запасов влаги районов капиллярного увлажнения близки к таковым в районах обводнения.

Максимум запасов влаги в теплую часть года лежит между капиллярной и наименьшей влагоемкостью почвы. По многолетним данным, на суглинистых почвах в среднем он превышает 200 мм, на супесчаных — 150 мм. Годовой минимум запасов продуктивной влаги в метровом слое суглинистых почв несколько больше 100 мм, супесчаных — несколько меньше 100 мм. Возможность капиллярного передвижения влаги в этих районах исключается в течение 2—2,5 летних месяцев на суглинистых почвах лишь в верхних слоях, на супесчаных — во всей метровой толще.

**Тип полного весеннего промачивания** (рис. 26, кривая 3) свойствен районам глубокого залегания грунтовых вод, где капиллярная кайма не достигает корнеобитаемого слоя. Годовой максимум запасов продуктивной влаги здесь наблюдается весной. Он равен наименьшей влагоемкости почв и в метровом слое суглинистых почв составляет 170—180 мм, а на мощных черноземах 200 мм.

Годовой минимум запасов продуктивной влаги наблюдается к концу вегетации сельскохозяйственных культур и, по средним многолетним данным, колеблется в пределах 50—100 мм, в отдельные же годы он может опускаться даже до нуля. Легкоподвижная влага закрытых капилляров имеется лишь весной над мерзлым слоем почвы, несущим водное зеркало просачивающихся талых вод.

**Тип слабого весеннего промачивания** (рис. 26, кривые 4 и 5) характерен для засушливых районов с глубоким залеганием грунтовых вод. Годовой максимум запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы здесь также наблюдается весной. Но даже в это время, по средним многолетним данным, запасы влаги метрового слоя почвы значительно ниже его наименьшей влагоемкости, в наиболее же засушливых районах они составляют всего лишь 50—70 мм. Глубина промачивания почвы в отдельные годы не превышает 50 см.

Годовой минимум запасов влаги наблюдается осенью, нередко он падает до нуля. В течение всего года, исключая короткий период снеготаяния, почва здесь лишена легкоподвижной влаги. Передвижение ее по почвенному профилю происходит в основном путем гидратации и в парообразном виде. В зимнее время, в условиях устойчивого промерзания, внутрипочвенные передвижки влаги не играют существенной роли: мерзлые слои сохраняют свою влажность в течение всей зимы практически постоянной.

Описанные закономерности формирования запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы и выделение типов годового хода влагозапасов установлены на основе имеющихся материалов по водному режиму почв СССР. В последние годы Гидрометслужбой СССР организована сеть водно-балансовых станций, материалы наблюдений которых позволяют уточнить многие недостающие ясные моменты закономерностей процесса формирования запасов влаги в корнеобитаемом слое почвы и роли отдельных элементов водного баланса в этом процессе.

## Глава VIII

### ВЛИЯНИЕ ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ НА ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЕВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Влажность почвы является одним из факторов, определяющих условия произрастания сельскохозяйственных культур. Для большинства районов нашей страны неустойчивость урожаев от года к году, а местами и низкие их средние уровни обуславливаются несоответствием имеющихся в почве запасов влаги потребности в ней растений. Связь урожаев с увлажнением почвы наблюдается повсеместно.

#### Потребность растений во влаге

Как уже ранее говорилось, для нормального фотосинтеза растительные клетки всегда должны быть насыщены водой и находиться в тесном соприкосновении с окружающей атмосферой, снабжающей их углекислотой. Постоянный же тесный контакт насыщенных водой клеток с атмосферой обуславливает усиленное испарение влаги клетками растений — транспирацию. Следствием этого является необходимость непрерывного поступления влаги в растение. Соотношение между поступлением влаги в растение и расходом ее на транспирацию называется водным балансом растений [127, 129].

В обычных условиях в водном балансе растений не обнаруживается значительного дефицита и содержание воды в растениях (в процентах веса сухого вещества) представляет собой довольно постоянную величину. Дефицит влаги в растениях 5—10% (у некоторых из них 20%), наблюдаемый в дневные часы в связи с усиленной транспирацией, не причиняет растениям особого вреда и не вызывает их увядания. При большем дефиците влаги в растениях нормальный процесс фотосинтеза нарушается, а тем самым нарушается и нормальный процесс формирования урожая. С точки зрения сельскохозяйственного производства потребность растений во влаге удовлетворяется полностью таким режимом водного баланса растений, при котором может быть получен максимальный урожай.

Долгое время мерой потребности растений в воде считалось количество ее, расходуемое путем транспирации на создание единицы сухого вещества. Эта величина получила название «транспи-

рационный коэффициент». Изучению транспирационных коэффициентов различных культур было посвящено огромное количество работ за период, охватывающий больше 100 лет.

В результате этих исследований выяснилось, что величины транспирационных коэффициентов весьма неустойчивы. Например, полученные разными исследователями транспирационные коэффициенты для яровой пшеницы колеблются от 230 до 1530 [39]. Причины таких различий кроются в том, что наибольший эффект влияния любого фактора, в том числе и влаги, выявляется только при полной обеспеченности растений всеми другими факторами, что далеко не всегда соблюдалось в опытах. Главным же дефектом постановки опытов был недоучет водно-физических свойств почв — влажности завядания, влагоемкости и др. Обработка многочисленных данных вегетационных опытов по влиянию влажности почвы на урожай показала, что нередко в силу недоучета водных свойств почвы влажность ее в сосудах была близкой или даже ниже влажности устойчивого завядания.

Нередко поливы производились такими малыми дозами, что не могли промачивать почву во всем объеме вегетационного сосуда. Это резко ограничивало корнеобитаемую зону и площадь питания растений и во многих случаях приводило к неправильным выводам и заключениям.

К настоящему времени можно считать установленным, что растение тратит на создание единицы сухого вещества тем меньше воды, чем полнее удовлетворены требования его к другим факторам роста, и что молодая листовая поверхность работает производительнее, чем старая [254]. Наиболее сильно недостаток влаги сказывается на процессах роста [114, 163]. При ее недостатке больше всего страдают те органы растения, которые проходят в это время первые стадии роста.

Мерой оценки влагообеспеченности растений должно служить отношение количества добываемой им влаги в данных конкретных условиях роста и развития к количеству влаги, потребной растению для создания максимально высокого урожая. В настоящее время нет физиологически обоснованных количественных показателей влагообеспеченности растений. Так, почти неизвестно, при каких запасах влаги в почве наступают и в какой степени проявляются такие яркие физиологические показатели влагообеспеченности растений, как степень отверстости устьиц, концентрация клеточного сока в клетках листа и величина сосущей силы листьев. Комплексных сопряженных агрогидрологических и физиологических исследований в полевых условиях почти нет, и постановка их сложна в связи со сложностью реакции растений. Экспериментальными работами физиологов установлено, что даже в одном и том же растении одинаковые органы в одно и то же время могут быть неодинаково обеспечены водой. Например, листья одного и того же растения в один и тот же момент могут иметь различные величины сосущей силы, концентрации клеточного сока и др. Или, например, влагообеспеченность зерна в верхней части колоса в

период его созревания всегда меньше, чем в нижней его части [2] и др.

Рядом авторов предложены косвенные методы выявления потребности растений в воде и оценки их влагообеспеченности, основанные на метеорологических данных.

Р. Э. Давид [53] считал возможным использовать дефицит влажности воздуха в качестве мерила транспирации культурных растений, что в дальнейшем получило признание и нашло развитие у многих исследователей.

Х. Л. Пенман [162] считает, что сохранение максимальной скорости транспирации есть необходимое условие максимального роста, и поэтому он предложил потребность растения во влаге характеризовать потенциальной транспирацией  $E_T$ , понимая под  $E_T$  «количество воды, транспируемое в единицу времени низкой зеленой культурой, полностью затеняющей почву, выравненной по высоте и полностью обеспеченной влагой». При полной обеспеченности влагой скорость транспирации определяется главным образом погодными условиями. Различия между культурами несущественны. Поэтому  $E_T$  может быть рассчитано по метеорологическим данным: продолжительности солнечного сияния, средней температуре воздуха, средней упругости водяного пара, средней скорости ветра по формуле

$$E_T = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} H_T + E_{aT}}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}, \quad (58)$$

где  $H_T = 0,75R_1 - R_B$ ,  $E_{aT} = 0,35(1 + 0,537u)(e_a - e_d)$ ,  $E_T$  — потенциальная транспирация,  $\Delta$  — константа, зависящая от температуры и равная тангенсу угла наклона касательной кривой, выражающей зависимость упругости насыщения от температуры воздуха, в точке, соответствующей средней температуре воздуха,  $\gamma$  — психрометрическая постоянная (отношение  $\Delta/\gamma$  — величина безразмерная, от которой зависит соотносительная роль  $H$  и  $E_a$  в уравнении),  $H_T$  — радиационный баланс, соответствующий характеру поверхности, в том числе величине альбедо зеленой массы, равной 25%,  $R_1$  — суммарная приходящая коротковолновая радиация; ее можно рассчитать по формуле

$$R_1 = R_a \left( 0,18 + 0,55 \frac{n}{N} \right), \quad (59)$$

где  $R_a$  — теоретический максимум солнечной радиации — та ее величина, которую получила бы данная точка земной поверхности при отсутствии атмосферы (ее можно найти в таблицах),  $n/N$  — отношение наблюдаемой продолжительности солнечного сияния к теоретически возможной,  $R_B$  — эффективное длинноволновое излучение земной поверхности,  $E_{aT}$  — иссушающая способность атмосферы на высоте, для которой проводится расчет,  $u$  — скорость

ветра (м/с) на высоте 2 м, ( $e_a - e_d$ ) — дефицит влажности воздуха на высоте, для которой производится расчет.

Все энергетические величины выражены в миллиметрах слоя воды, испаряющейся при затрате соответствующей энергии.

Этот метод расчета потенциальной транспирации позволяет составить для разных климатических условий достаточно полное представление о транспирации зеленой массы, сплошь покрывающей почву и беспрепятственно снабжаемой водой. При расчетах отношения  $E_T/E_0 = f$ , позволяющего рассчитать потенциальную транспирацию для разных климатических поясов и разных времен года, основным действующим фактором была принята длина дня. Соответственно таким расчетам для экваториальной зоны в течение всего года  $f \approx 0,7$ , для Западной Европы летом  $f = 0,8$ , зимой — 0,6, осенью и весной — 0,7.

А. М. Алпатов [7] потребность растений в воде определяет как «расход воды в полевых условиях на транспирацию и испарение с поверхности почвы при бесперебойном притоке влаги к корневой системе растений, находящихся в определенном сообществе и развивающихся при определенных, свойственных каждому типу культуры площадях питания, условиях освещения и агротехники». По методу Алпатова, потребность растений во влаге выражается суммой среднесуточных дефицитов влажности воздуха (в мм) за вегетационный период, умноженной на коэффициент 0,65. Указанный коэффициент установлен автором на основе исследования соотношений валовых расходов воды при оптимальном увлажнении почвы и испаряемости в лесной зоне в естественных условиях, в засушливых районах — в условиях орошения. Учитывая, что потребность воды, кроме экологических условий, определяется также «ритмом развития» растений, автор предлагает устанавливать коэффициенты для более коротких периодов (по декадам) — биологическую кривую.

А. В. Процоров [171] в качестве показателя, определяющего потребность растений во влаге, предложил дефицит влажности воздуха, вернее сумму среднесуточных дефицитов влажности воздуха за определенный период, выраженную в миллиметрах. Величина суммарного испарения, равная сумме среднесуточных дефицитов за декаду, взятая с коэффициентом 0,6, является показателем полной влагообеспеченности яровой пшеницы в период ее роста от всходов до цветения. В период от цветения до восковой спелости показателем оптимальной влагообеспеченности принята величина суммарного испарения, равная сумме среднесуточных дефицитов, взятых с коэффициентом 0,4. Коэффициенты 0,6 и 0,4 автором установлены на основе отношения суммарного испарения к сумме среднесуточных дефицитов за соответствующие отрезки вегетационного периода яровой пшеницы во влажные и очень влажные годы в засушливых районах Заволжья. На основании отношения величины фактического суммарного испарения к потребности растений во влаге Процоровым разработан метод оценки влагообеспеченности (в процентах оптимума) яровой пшеницы. Такая оценка

производится за каждую декаду и суммарная — за весь период вегетации. Этот же принцип оценки условий влагообеспеченности использован О. М. Конторщиковой при разработке методики оценки влагообеспеченности сахарной свеклы [99].

М. С. Кулик [112] предлагает потребность яровых зерновых культур во влаге на той или иной территории определять по средней испаряемости, вычисляемой по карте испарения с водной поверхности малых водоемов Б. Д. Зайкова, по схеме районирования СССР по типу годового хода испарения и по таблице испарения с водной поверхности малых водоемов по месяцам в долях суммы испарения за год. Для определения испаряемости в данном году вносится поправка на особенности прогнозируемой погоды в отношении температуры. Недостаток воды до оптимальной влагообеспеченности яровых зерновых культур определяется как разность между вычисленной описанным выше способом потребностью во влаге и количеством ожидаемых за период вегетации растений осадков. Для оценки засушливости автором установлены пределы уменьшения запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы, вызывающие определенное снижение урожая зерна.

В последнее время имеются предложения выражать влияние запасов почвенной влаги на растение через относительную транспирацию  $T/T_0$ , используя зависимости натяжения почвенной влаги от ее запасов. Исходными положениями к этому служат следующие представления и результаты исследований.

Как правило, давление влаги в атмосфере значительно ниже, чем в растениях и почве. Соответственно термодинамическим законам вода в системе может передвигаться только в направлении снижения давления, т. е. в данном случае двигаться в направлении почва—растение—атмосфера. Вода, которую этот поток приносит к поверхности листьев, ими испаряется—транспирируется. Поэтому можно считать, что скорость потока  $i$  равна скорости транспирации  $T$ .

При высокой влажности почвы, в силу наличия достаточного количества подвижной влаги, скорость потока определяется только скоростью испарения с поверхности листьев, регулируемой метеорологическими условиями, преимущественно притоком тепла к испаряющей поверхности, т. е. равна потенциальной транспирации  $T_0$  (испаряемости).

По мере уменьшения влажности почвы падает давление почвенной влаги, уменьшается капиллярная влагопроводность почвы и скорость потока снижается соответственно уравнению

$$i = -K \frac{\Delta P}{\Delta l}, \quad (60)$$

где  $K$  — коэффициент влагопроводности почвы,  $\Delta P/\Delta l$  — градиент давления. Как следствие этого, замедляется подача воды к корням растения и уменьшается транспирация  $T$ . Она становится меньше  $T_0$  и может быть выражена в долях  $T_0$ , т. е.  $T = aT_0$ ,  $a = T/T_0$ ,  $a$  —

коэффициент пропорциональности, его принято называть относительной транспирацией.

Между относительной транспирацией и давлением почвенной влаги существует функциональная зависимость. В интервале давления  $0 > P > -4$  атм зависимость выражается прямой, параллельной оси давления,  $T/T_0 = 1$ . В интервале давления  $-25 < P < -4$  атм, соответствующего более низким, приближающимся к нулю запасам продуктивной влаги, эта зависимость также выражается прямой линией, но идущей под углом к оси давления. Она представлена уравнением [215]

$$\frac{T}{T_0} = D \ln \frac{|-25|}{|P|}. \quad (61)$$

Вегетационными опытами (США) для засушливых районов установлена пропорциональная зависимость между относительной транспирацией и продукцией сухого вещества

$$P = m_e \frac{W}{E_e}, \quad (62)$$

где  $P$  — продукция сухого вещества (г на сосуд),  $W$  — транспирированная из сосуда вода (кг),  $E_e$  — испаряемость (среднее количество воды, испарившейся со свободной поверхности водного испарителя (мм/сутки),  $m_e$  — коэффициент пропорциональности.

Для некоторых культур Великой Равнины США установлены следующие величины  $m_e$ : для сорго Красное янтарное — 20,7; сорго черное Кафрское — 22,7; пшеница Кубанка — 11,5; пшеница Gallegos — 9,8; люцерна АД1-Е23 — 5,5 [217].

### Оценка влагообеспеченности сельскохозяйственных культур

В начале 40-х годов агрогидрологи Гидрометслужбы СССР начали разработку доступных для оперативного обслуживания сельского хозяйства страны методов количественной оценки влагообеспеченности сельскохозяйственных культур на основе данных о запасах продуктивной влаги в почве и о расходах влаги в процессе роста и формирования урожаев в различных почвенно-климатических зонах СССР. Исходными положениями послужили представления о том, что: а) урожай формируется только за счет продуктивной влаги; б) при возрастании дефицита продуктивной влаги прогрессирующе снижается скорость транспирации; в) скорость транспирации достигает максимально возможных значений  $T_0$  только при наличии достаточного количества легкоподвижной влаги, обеспечивающего бесперебойную подачу ее к корням растений, что соответствует натяжению почвенной влаги от 0 до  $\approx -4$  атм, т. е. е. превышает влажность разрыва капилляров; г) по мере уменьшения запасов продуктивной влаги вследствие уменьшения натяжения почвенной влаги и ее подвижности скорость транспирации

непрерывно уменьшается, приближаясь к нулю, а вместе с тем непрерывно уменьшаются, стремясь к нулю, и приросты растительной массы.

На первых этапах для получения хотя бы приближенных количественных показателей обеспеченности влагой сельскохозяйственных культур были привлечены сопряженные наблюдения над влажностью почвы и состоянием сельскохозяйственных культур, оцениваемым в баллах. При этом исходили из того, что средние изменения оценок состояния посевов, рассчитанные по зависимости их от запасов влаги в почве, отражают только обеспеченность посевов влагой, а не весь комплекс равновероятных факторов, определяющих состояние посевов, и поэтому могут быть приняты за балловые оценки влагообеспеченности. В последующем для выявления связей формирования отдельных элементов продуктивности и урожая культур с условиями водоснабжения организовывались специальные полевые исследования.

**Оценка влагообеспеченности зерновых культур.** Для получения количественных показателей обеспеченности влагой зерновых культур в более ранних работах С. А. Вериги запасы продуктивной влаги сопоставлялись с оценкой состояния растений. В этих целях использовались массовые систематические многолетние наблюдения всей сети гидрометстанций, отражающие сопряженные изменения запасов продуктивной влаги в почве и состояние культур [31, 33, 34, 37].

В результате обработки этих массовых материалов была установлена прямая связь состояния посевов с количеством продуктивной влаги в почве и выявлены характерные особенности этой связи для отдельных отрезков вегетационного периода зерновых: а) формирования всходов и листьев, б) формирования побегов, в) формирования колоса и цветка и г) формирования зерна.

Установлено, что в период формирования всходов (до кущения), когда только начинает развиваться транспирирующая надземная масса, а корневая система состоит из зародышевых корней, обычно проникающих не глубже 20 см, состояние посевов почти всецело определяется влажностью этого верхнего слоя почвы (0—20 см).

При средних за декаду запасах продуктивной влаги в пахотном горизонте меньше 5 мм ( $pF \approx 4,1$ ), как правило, всходы совсем не появляются. В среднем удовлетворительное состояние всходов (оценка 3 балла)<sup>1</sup> соответствует на черноземных, в основном суглинистых почвах среднедекадным запасам влаги  $\approx 15$  мм ( $pF \approx 4,0$ ), на оподзоленных, в основном супесчаных почвах 12 мм. Наиболее высокие оценки отмечаются при влажности, близкой к наименьшей влагоемкости ( $pF \approx 2,7$ , табл. 44).

<sup>1</sup> Баллы оценки: 1 — очень плохое состояние, 2 — плохое, 3 — удовлетворительное, 4 — хорошее. Отсутствие средней оценки 5 баллов может быть объяснено тем, что в принятой системе оценок 5 является предельно высоким баллом, следовательно, отклонения возможны только в сторону понижения, а средние не могут достигать 5 баллов.



Таблица 44

Средние оценки состояния всходов зерновых культур при различных запасах продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см

Почвы	Средние за декаду запасы влаги (мм)												
	1—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35	36—40	41—50	51—60	61—70	71—80	>80
Черноземные	—	2,0	2,8	3,1	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	—	—	—	—
Оподзоленные	1,4	1,4	3,0	3,6	3,9	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0

При еще больших запасах влаги (оподзоленные почвы) в отдельных случаях всходы имеют и более низкие оценки состояния. Возможно, это объясняется плохими условиями проведения сева (заделки семян) вследствие липкого и подчас текучего состояния почвы при такой высокой влажности.

В период кушения (до выхода в трубку) идет образование побегов, узловых корней и закладка колоса, тем самым определяется укоренение растений, число стеблей и число колосков в колосе. В тех случаях, когда во время кушения средние за декаду запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см бывают меньше 10 мм ( $pF \approx 4,0$ ), наблюдается резкое ухудшение посевов: снижение оценок на 0,5—1,0 балла за декаду<sup>1</sup>.

Некоторое ухудшение посевов в этот период отмечается обычно и во всех тех случаях, когда средние за декаду запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см бывают меньше 20 мм ( $pF \approx 3,9$ ). Если запасы влаги больше 30 мм ( $pF \approx 3,7$ ), то плохие и удовлетворительные всходы обычно несколько улучшаются (повышаются их оценки), а хорошие и отличные сохраняют свои оценки (табл. 45).

Таблица 45

Изменение оценок состояния зерновых культур (баллы) в период кушение — выход в трубку в зависимости от запасов продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см

Средние за декаду запасы влаги (мм)								
1—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35	36—40	41—50
—1,0	—0,5	—0,3	—0,2	0	0	+0,2	+0,5	+0,5

В период от выхода в трубку до цветения у зерновых культур создается почти вся вегетативная масса, формируется колос и цве-

<sup>1</sup> В соответствии с принятой для гидрометстанций методикой оценки состояния посевов не могут непосредственно отражать влияние влажности почвы на процесс закладки колоса и на укоренение растений. Они отражают это влияние постольку, поскольку оно сказывается на состоянии надземной массы посевов.

ток — идет развитие колосков в колосе, закладка и развитие цветков в колосках. Только при полной обеспеченности посевов влагой в этот период число развитых колосков может совпадать с числом колосков, заложенных в предшествующий период, в противном случае часть колосков остается недоразвитой. Уже в начале этого периода зародышевые корни обычно начинают черпать воду из подпахотных слоев почвы, а узловые корни весьма полно улавливают влагу пахотного слоя. Ко времени цветения вегетативная масса достигает максимальной величины, а работоспособность корневой системы — почти полной мощности. Однако нередко глубина проникновения корней ограничивается условиями увлажнения и засоления нижних слоев почвы, которые могут оставаться не освоенными корневой системой как из-за большой сухости, так и в связи с плохой аэрацией и засолением. В этот период в метровом слое суглинистых почв запасы продуктивной влаги меньше 80 мм (что составляет 40—50% НВ и  $pF > 3,9$ ) бывают недостаточными для того, чтобы удерживать посевы в их начальном состоянии, и состояние посевов ухудшается. При запасах 100—200 мм (60—100% НВ,  $pF = 3,8 \div 2,7$ ) состояние посевов заметно улучшается.

Если оценки состояния посевов в начале декады принять за единицу, то в среднем в конце декады оценки при различных запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы будут иметь значения, приведенные в табл. 46.

Таблица 46

**Отношение оценок состояния посевов зерновых культур в конце декады к оценке их состояния к началу декады при различных запасах продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см в период формирования колоса и цветка**

Средние за декаду запасы влаги (мм)										
1—20	21—40	41—60	61—80	81—100	101—120	121—140	141—160	161—180	181—200	>200
0,87	0,92	0,95	0,96	1,03	1,05	1,06	1,15	1,02	1,06	1,00

В отдельных случаях в годы, когда в нижних слоях почвы продуктивная влага практически отсутствует, а погода устойчиво дождливая и верхний слой почвы непрерывно увлажняется, запасы влаги метрового слоя меньше 80 мм могут быть достаточными. Но в таких случаях посевы находятся в самой жесткой зависимости от текущей погоды: период бездождья даже небольшой длительности может нанести им сильный ущерб.

В период от цветения до восковой спелости формируется зерно. Почти сразу после цветения прекращается прирост вегетативной массы, а затем начинается отмирание листьев и расходы на транспирацию уменьшаются. Недостаток влаги непосредственно после цветения, в период завязывания зерна, снижает количество зерен в колосе и приводит к черездзернице и пустоколосости. Недостаток

влаги в более позднюю часть этого периода, во время налива зерна, снижает абсолютный вес зерна и вызывает явления захвата, запала. В период молочной спелости (от начала молочной до начала восковой спелости) наиболее высокие оценки состояния посевов отмечаются при запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы около 80 мм ( $pF \approx 3,9$ ).

Завязывание и налив зерна главного побега яровой пшеницы обычно в основном обеспечиваются нижним ярусом корневой системы — зародышевыми и колеоптильными корнями, проникающими в это время при благоприятных условиях увлажнения до 1 м и глубже и бесперебойно снабжающими растения водой. Узловые же корни, находящиеся в верхнем слое, часто в это время пересыхающем, снабжают растение водой лишь эпизодически, после смачивания этого слоя дождями. Поэтому имеющиеся в нашем распоряжении данные сетевых декадных наблюдений над влажностью в метровом слое почвы не дают исчерпывающей картины. С достоверностью можно лишь утверждать, что для основной части земледельческих районов СССР нормального абсолютного веса зерно достигает при запасах влаги в метровом слое почвы, не меньших 40 мм в среднем за период цветения — начало восковой спелости. При запасах, близких к 25 мм (12—14% НВ,  $pF \approx 4,1$ ), наблюдается сильное снижение абсолютного веса зерна (на 30—50%), а при запасах, меньших 10 мм ( $pF > 4,1$ ), прирост зерна прерывается и происходит преждевременное его подсыхание. В южных районах с засоленными почвами, где в этот период корни обычно проникают глубже 1 м, налив зерна может осуществляться и за счет влаги нижних слоев даже при запасах метрового слоя, меньших 25 мм. Если в этот период удерживается прохладная дождливая погода, хотя бы и с небольшим количеством выпадающих осадков, водоснабжение растений может удовлетворительно осуществляться узловыми корнями, развивающимися в самом верхнем смоченном слое почвы.

При запасах продуктивной влаги в период цветения—восковая спелость, больших 125 мм (больше 70% НВ,  $pF > 3,7$ ), обычно наблюдается ухудшение посевов вследствие полегания и сильного развития болезней и вредителей.

Урожай — вес выращенного на единице площади зерна — определяется густотой стояния растений, их продуктивной кустистостью, озерненностью и абсолютным весом зерна. Зависимость урожая от условий увлажнения складывается из последовательного влияния увлажнения почвы на состояние посевов в отдельные фазы вегетационного периода. Неблагоприятные условия водоснабжения посевов в предшествующие фазы вегетационного периода могут быть до некоторой степени компенсированы благоприятными условиями увлажнения в последующие фазы развития, и наоборот, влияние благоприятных условий может быть снижено или даже аннулировано в последующие фазы. Так, до некоторой степени могут компенсировать друг друга отдельные элементы продуктивности: число растений, число колосоносных стеблей, число

колосков в колосе, число зерен в колосе и абсолютный вес зерна. Поскольку развитие побегов кушения отстает от главного стебля, условия увлажнения для формирования урожая главного стебля и побегов кушения обычно бывают различны.

Наиболее тесная связь урожаев зерновых с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы наблюдается в период формирования колоса и цветка (выход в трубку — цветение). Обычно чем выше запасы влаги в этот период, тем выше урожай. В большинстве случаев максимальные урожаи совпадают с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы 125—175 мм. Однако в отдельных случаях таким большим запасам соответствуют и очень низкие урожаи, 2—3 ц/га, в основном обусловливаемые полеганием и грибковыми заболеваниями посевов при такой высокой влажности почвы. Вследствие этого максимум средних урожаев соответствует запасам продуктивной влаги 110 мм.

Если принять группу самых высоких урожаев за единицу, то средние величины урожаев при различных запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы за период формирования колоса и цветка (выход в трубку — цветение) будут иметь значения, приведенные в табл. 47.

Таблица 47

**Отношение величины урожаев зерновых культур при различных запасах продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см в период формирования колоса и цветка к урожаю при оптимальных влагозапасах**

Средние за период запасы влаги (мм)						
1—25	26—50	51—75	76—100	101—125	126—150	>150
0,18	0,46	0,70	0,86	1,00	0,74	0,68

Сопоставление оценок состояния посевов в момент наступления восковой спелости с величинами урожаев (если принять урожай, соответствующий отличным оценкам состояния посевов, за единицу) показало, что в среднем урожай при более низких оценках будет выражаться следующими значениями:

Оценка состояния . . .	1	2	3	4	5
Урожай . . . . .	не учитывается	0,15	0,50	0,75	1,00

В заключение следует отметить, что полученные выводы схематичны, но благодаря массовости и сопряженности использованных материалов они достаточно надежны, объективны и, что основное, позволяют оценивать на протяжении всего периода вегетации влияние динамики влажности почвы на состояние и урожаи зерновых культур.

Для выявления связей формирования отдельных элементов продуктивности и урожаев зерновых культур специальные исследова-

ния были организованы в засушливых районах, где судьба урожая в основном решается условиями водоснабжения растений. Проведенные в засушливых районах северной половины Казахстана и в Кулунде полевые исследования выявили тесную зависимость отдельных элементов продуктивности и урожая зерновых культур от количества используемой ими в период вегетации воды и позволили установить ряд количественных связей [183]. Связи устанавливались как с факторами, прямо характеризующими условия водоснабжения посевов (запасы продуктивной влаги в почве, суммарные расходы и др.), так и с обуславливающими их гидрометеорологическими факторами (осадки, температура). В уравнения также вводились некоторые показатели состояния растений, наиболее ярко отражающие условия водоснабжения посевов в тот или иной период их вегетации (высота растений, количество колосков в колосе и др.).

Выявление зависимости формирования урожая яровой пшеницы от условий водоснабжения проводилось по основным отрезкам вегетационного периода, с тем чтобы иметь возможность характеризовать весь процесс формирования урожая, начиная с отдельных элементов продуктивности.

Одним из основных условий продуктивного использования влаги и питательных веществ верхних слоев почвы является хорошо развитая вторичная корневая система растений. Развитие вторичных корней у яровой пшеницы происходит в период кущения — колошения, причем весьма интенсивное увеличение их количества имеет место в период выход в трубку — колошение [19, 106]. Для выявления связи между условиями водоснабжения и развитием корневой системы были выведены зависимости количества образующихся узловых корней от суммарных расходов влаги из верхнего двадцатисантиметрового слоя почвы за период выход в трубку — колошение. Здесь, как и в последующем, под суммарными расходами подразумевается количество влаги, израсходованное из почвы за тот или иной отрезок вегетации растений, плюс выпавшие за это же время осадки.

Полученные связи таковы:

$$y = 0,135Q - 0,9, \quad (63)$$

$$r = 0,84 \pm 0,028, \quad E_{50} = \pm 1,5.$$

В этом уравнении  $y$  — количество образовавшихся корней,  $Q$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—20 см за период выход в трубку — колошение (мм),  $r$  — коэффициент корреляции,  $E_{50}$  — вероятная ошибка (50%).

Одним из основных элементов продуктивности, отражающихся на урожае зерна пшеницы, является количество колосков в колосе. Как известно, закладка и дифференциация колосков в колосе происходит в весьма ранний период развития, вскоре после вступления в фазу кущения.

Исследованиями, проведенными Б. П. Пономаревым в полевых условиях в ряде пунктов РСФСР [165], установлена количественная зависимость числа колосков от запасов продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см в период закладки колосков и от среднесуточной температуры воздуха за этот же период, выраженная уравнением

$$z = 0,62W - 2,11t - 101,8, \quad (64)$$

где  $z$  — число колосков в колосе (в % максимально возможного для данного сорта),  $W$  — запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см в период закладки колосков (мм),  $t$  — среднесуточная температура воздуха за этот же период.

По исследованиям в степных районах северной половины Казахстана и в Кулунде были установлены зависимости количества колосков в колосе от запасов продуктивной влаги в слое почвы 0—50 см за декаду, предшествующую дате выхода в трубку, и от суммарных расходов влаги из слоя почвы 0—20 см за период посев — выход в трубку:

$$z = 0,02Q - 0,56t + 22,6, \quad (65)$$

$$r = 0,84 \pm 0,029, \quad E_{50} = \pm 1,0,$$

$$z = 0,04W - 0,70t + 23,7, \quad (66)$$

$$r = 0,89 \pm 0,023, \quad E_{50} = \pm 0,8.$$

В этих уравнениях  $z$  — количество колосков в колосе,  $Q$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—20 см за период посев — выход в трубку (мм),  $W$  — запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—50 см к началу декады, предшествующей дате выхода в трубку (мм),  $t$  — среднесуточная температура воздуха за ту же декаду.

Из приведенных уравнений следует, что число формирующихся колосков в колосе сильно зависит от температуры за декаду, предшествующую трубкованию, а также от запасов продуктивной влаги в верхнем полуметровом слое почвы, куда к этому времени проникают корни растений: чем ниже температура и больше запасы влаги, тем больше колосков закладывается в колосе пшеницы. Расчеты количества колосков в колосе, произведенные по уравнениям (65), (66), выведенным для степных районов северной половины Казахстана и Кулунды (районированные здесь сорта Шортандинка, Акмолинка, Альбидум 3700), дали результаты, близкие к расчетам по уравнению (64).

Хорошим показателем степени благоприятствования условий водоснабжения формированию колосков и цветков в колосе яровой пшеницы является высота растений. Для районированных в Северном Казахстане и Кулунде сортов яровой пшеницы зависимость высоты растений  $H$  от суммарных расходов влаги в период роста, т. е. за период выход в трубку — цветение плюс 5 дней ( $Q$ ), и

запасов влаги в метровом слое почвы ко времени выхода в трубку  $W$  выразилась уравнением

$$\begin{aligned} H &= 0,44Q + 0,22W + 5,6, \\ r &= 0,91 \pm 0,02, \quad E_{50} = \pm 4,4. \end{aligned} \quad (67)$$

Агрометеорологические условия периода формирования зерна редко обеспечивают развитие всех заложившихся ранее колосков и цветков в колосе, особенно в описываемых районах. Поэтому даже при исключительно благоприятных условиях роста пшеницы в предшествующий период количество зерен в колосе может быть снижено неблагоприятными условиями периода формирования зерна. А так как в засушливых районах и предшествующий период (формирование колосков) обычно характеризуется недостаточно благоприятными условиями, то практически число сформировавшихся зерен почти никогда не достигает предела, присущего тому или иному сорту.

Зависимость количества зерен от суммарных расходов влаги за период выход в трубку — молочная спелость в этих районах выразилась уравнением

$$\begin{aligned} z &= 0,132Q + 3,4, \\ r &= 0,80 \pm 0,042, \quad E_{50} = \pm 2,0, \end{aligned} \quad (68)$$

где  $z$  — количество зерен в колосе,  $Q$  — суммарные расходы влаги из метрового слоя почвы за период выход в трубку — молочная спелость (мм).

Соотношение между числом зерен и числом колосков для районированных здесь сортов яровой пшеницы оказалось очень устойчивым, но несколько меньшим, чем полученное ШигOLEвым [1,69] для сортов, районированных на Европейской территории СССР [250], что, очевидно, объясняется большей сухостью климата этих районов. Зависимость числа формирующихся зерен от суммарных расходов влаги за период выход в трубку — молочная спелость и от числа колосков в колосе представлена уравнением

$$\begin{aligned} z &= 0,04Q + 1,23n - 4,3, \\ r &= 0,85 \pm 0,028, \quad E_{50} = \pm 1,8. \end{aligned} \quad (69)$$

Условия периода колошение — восковая спелость определяют не только количество, но и качество зерна — его абсолютный вес [249]. Б. П. Пономарев [165] по материалам экспедиционных исследований в Бузулукском районе Оренбургской области и в Подмосковье, а также по материалам наблюдений агро- и гидрометеостанций в различных пунктах РСФСР установил связь между весом 1000 зерен  $p$ , расходами влаги из метрового слоя почвы в период формирования зерна (колошение — восковая спелость)  $Q$  и средней температурой воздуха за этот же период  $t$ :

$$p = 0,10Q - 0,66t + 35,37. \quad (70)$$

По материалам экспедиционных исследований в степных районах северной половины Казахстана и в Кулунде зависимость абсолютного веса зерна от условий водоснабжения характеризуется уравнением

$$p=0,10Q-0,35t+30,1 \quad (71)$$

$$r=0,91 \pm 0,031, \quad E_{50}=\pm 1,6.$$

В этом уравнении  $p$  — вес 1000 зерен (г),  $Q$  — суммарные расходы воды за период колошение — восковая спелость (мм),  $t$  — средняя температура воздуха за этот же период.

Связь, представленная уравнением (71), характеризуется высоким коэффициентом корреляции (0,91) и малой вероятной ошибкой ( $\pm 1,6$ , что составляет всего примерно 5% величины абсолютного веса зерна).

Рассмотренные выше зависимости формирования отдельных элементов продуктивности еще не дают возможности полностью оценить условия формирования урожая в зависимости от влагоснабжения. Ряд исследователей установили тесную связь урожая с количеством выпадающих в период вегетации осадков. Так, по работам В. М. Обухова [158], связь между осадками в период всходы — начало цветения и урожаем в засушливых районах Юго-Востока Европейской территории СССР (ст. Безенчук) выражается коэффициентом корреляции 0,891. По работам Ф. Ф. Давитая [54], коэффициент корреляции между урожаями яровой пшеницы и осадками за период посев — колошение в степной зоне Европейской территории СССР достигает 0,93.

П. И. Колосковым [93] в результате анализа статистических данных об урожае по северным и северо-восточным областям Казахстана за 1936—1940 гг. установлено, что для определения величины средних урожаев большое, если не решающее, значение имеет количество осадков, выпадающих в холодную часть года (с температурой ниже  $5^{\circ}\text{C}$ ) и в течение 4 месяцев, следующих за наступлением температуры выше  $5^{\circ}\text{C}$ . Им дана формула зависимости урожая зерна яровой пшеницы от осадков этого периода

$$R=\frac{m-(Q_1+Q_2)}{T}, \quad (72)$$

где  $R$  — урожай зерна (ц/га),  $m$  — величина активных осадков за указанный период (мм),  $Q_1$  — расходы воды на сток (мм),  $Q_2$  — расходы воды на физическое испарение с поверхности почвы (мм),  $T$  — хозяйственный транспирационный коэффициент (мм).

В процессе анализа статистических данных об урожае и количества выпадающих осадков Колосков установил, что суммарное значение стока и физического испарения ( $Q_1+Q_2$ ) в условиях Казахстана составляет 130 мм, а величина хозяйственного транспирационного коэффициента  $T$ , т. е. количество воды в миллиметрах, израсходованного с площади 1 га путем транспирации на 1 ц воздушно-сухого зерна, равна 10 мм.



А. С. Конторщиков [98] разработал метод агрометеорологической оценки и прогноза условий формирования урожая яровой пшеницы, основанный на использовании транспирационных коэффициентов. Им предложены следующие расчетные формулы:

$$R_{\text{ср}} = \frac{E}{T_{\text{ср}}} \approx \frac{z - u}{T_{\text{ср}}}, \quad (73)$$

$$R_{\text{макс}} = \frac{E}{T_{\text{мин}}}, \quad (74)$$

где  $R_{\text{ср}}$  и  $R_{\text{макс}}$  — соответственно средние и максимальные урожаи (ц/га),  $E$  — транспирация за весь вегетационный период (мм),  $z$  — суммарное испарение за весь вегетационный период,  $u$  — испарение с поверхности почвы также за весь вегетационный период,  $T_{\text{ср}}$  и  $T_{\text{мин}}$  — соответственно средний и минимальный транспирационные коэффициенты.

Для определения величины испарения с поверхности почвы Конторщиков предлагает пользоваться постоянными (выведенными им) коэффициентами. Территория, в пределах которой можно пользоваться предложенными расчетными формулами, автором не указана.

Сопоставление урожая и условий водоснабжения яровой пшеницы в степных районах северной половины Казахстана и в Кулунде позволило установить следующие количественные связи между ними.

Зависимость урожая яровой пшеницы от количества влаги, израсходованной за весь период вегетации в целом, выражается уравнением

$$\begin{aligned} R &= 0,104Q - 8,0, \\ r &= 0,78 \pm 0,033, \quad E_{50} = \pm 2,0. \end{aligned} \quad (75)$$

Здесь  $R$  — урожай зерна яровой пшеницы (ц/га),  $Q$  — суммарные расходы влаги за период посев—восковая спелость (мм).

Следует отметить, что количественное выражение связи условий водоснабжения с урожаями яровой пшеницы, полученное по материалам исследований в степных районах северной половины Казахстана и в Кулунде в нормальные и сухие годы, почти совпало с уравнением связи, полученным Мاستинской по результатам исследований в степных районах Заволжья:

$$\begin{aligned} R &= 0,103Q - 8,1, \\ r &= 0,91. \end{aligned} \quad (76)$$

Условные обозначения те же, что и в уравнении (75).

Анализ связей между суммарными расходами за весь период вегетации и урожаями в нормальные и сухие годы (75) показывает, что каждые добавочно израсходованные 10 мм воды сверх 80 мм дают увеличение урожая примерно на 1 ц/га. Это величина

совпадает с хозяйственным транспирационным коэффициентом П. И. Колоскова. Расхождения величин урожаев, рассчитанных по установленным нами связям и по уравнению Колоскова, показали, что в степных районах Казахстана в 60% случаев они не превышают  $\pm 1$  ц/га, в 80% не превышают  $\pm 2$  ц/га и лишь в 20% случаев составляют  $\pm 2$ —3 ц/га, в полупустынных районах они меньше 1 ц/га. Более значительные отклонения (3—4 ц/га) имеют место в лесостепных районах.

В связи с тем что отдельные элементы продуктивности яровой пшеницы формируются в различные этапы ее роста и развития и что эти этапы характеризуются различной потребностью растений во влаге и различными условиями их водоснабжения, представлялось целесообразным установить количественные зависимости урожаев от суммарных расходов, учитывая при этом распределение их во времени. Такой раздельный учет дает возможность выявить удельный вес условий водоснабжения каждого отдельного периода в формировании урожая.

Уравнение связи урожая пшеницы с суммарными расходами влаги за периоды посев—выход в трубку, выход в трубку—цветение и цветение—восковая спелость в сухие и нормальные годы имеет вид

$$R = 0,017Q_1 + 0,127Q_2 + 0,147Q_3 - 7,4, \quad (77)$$

$$r = 0,88 \pm 0,020, \quad E_{50} = \pm 1,5,$$

где  $R$  — урожай зерна яровой пшеницы (ц/га),  $Q_1$  — суммарные расходы влаги за период посев—выход в трубку (мм),  $Q_2$  — то же за период выход в трубку—цветение (мм),  $Q_3$  — то же за период цветение—восковая спелость (мм).

Из уравнения (77) следует, что в засушливых районах Казахстана и Кулунды для формирования урожаев пшеницы решающее значение имеют количества влаги, расходуемые растениями в репродуктивный период, особенно в период цветение—восковая спелость.

Зависимость урожая зерна  $R$  от запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы к выходу растений в трубку  $W$  и от суммарного репродуктивного периода, особенно в период цветение—восковая спелость  $Q_{2,3}$  представлена уравнением

$$R = 0,123Q_{2,3} + 0,032W - 7,5, \quad (78)$$

$$r = 0,83 \pm 0,029, \quad E_{50} = \pm 1,9.$$

Как видим, зависимость достаточно тесная.

Кроме приведенных, были установлены связи урожая зерна яровой пшеницы  $R$  с количеством колосков в колосе  $z$ , высотой растений  $H$  и суммарными расходами влаги  $Q_2$  и  $Q_3$ :

$$R = 0,235z + 0,107Q_2 + 0,169Q_3 - 8,3, \quad (79)$$

$$r = 0,85 \pm 0,028, \quad E_{50} = \pm 1,5,$$

$$R=0,143Q_3+0,24H-8,9, \quad (80)$$

$$r=0,93 \pm 0,012, \quad E_{30}=\pm 1,8.$$

Уравнение (80) имеет самый высокий коэффициент корреляции (0,93). Таким образом, можно сказать, что высота растений, отражающая влагообеспеченность растений в период до цветения, и суммарные расходы, отражающие условия налива зерна, наиболее полно характеризуют условия формирования урожая в засушливых районах Казахстана и Кулунды.

Пределы применения приведенных выше уравнений связи урожая с условиями водоснабжения таковы: для  $R$  от 0,5 до 20 ц/га, для  $Q$  от 75 до 250 мм, для  $Q_1$  (посев—выход в трубку) от 5 до 80 мм, для  $Q_2$  (выход в трубку—цветение) от 20 до 120 мм, для  $Q_3$  (цветение—восковая спелость) от 10 до 80 мм, для  $Q_{2,3}$  (выход в трубку—восковая спелость) от 50 до 185 мм, для  $W$  (запасы продуктивной влаги к выходу в трубку) от 20 до 145 мм, для  $z$  (количество колосков в колосе) от 10 до 19, для  $H$  (высота растений) от 20 до 85 см.

Выявленные связи дают возможность количественно оценивать и прогнозировать условия формирования элементов продуктивности и урожая пшеницы в зависимости от водоснабжения посевов. Оценка этих условий выражается непосредственно величинами того или иного элемента продуктивности и урожая. По сути говоря, это как бы индексы, отражающие продуктивность яровой пшеницы в зависимости от водоснабжения при современном уровне агротехники.

Е. С. Улановой [226] выявлено решающее значение весенних запасов продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см для формирования урожая озимой пшеницы в черноземной зоне Европейской территории СССР. На рис. 27 даны линии наиболее вероятных, наименьших и наибольших урожаев озимой пшеницы в зависимости от запасов продуктивной влаги в почве весной. Зависимость урожаев загущенных посевов (2000—3000 стеблей на 1 м<sup>2</sup> весной) выражена параболической кривой с максимумом 40—42 ц/га, соответствующим запасам влаги 160—180 мм (близким к наименьшей влагоемкости почв),

$$y=-0,052x^2+1,77x-116,7, \quad (81)$$

где  $y$ —урожай пшеницы (ц/га),  $x$ —запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы весной (мм), корреляционное отношение  $\eta=0,73$ .

Связь урожаев озимой пшеницы при нормальной густоте стояния (весной 1000—2000 стеблей на 1 м<sup>2</sup>) и при изреженном стеблестое (400—900 стеблей на 1 м<sup>2</sup>) с запасами продуктивной влаги в почве весной прямолинейна. При любой погоде апреля и мая для посевов с нормальным стеблестоем она имеет вид

$$y=0,24x-10,2, \quad (82)$$

для посевов с изреженным стеблестоем —

$$y = 0,2x - 1,1. \quad (83)$$

В первом случае коэффициент корреляции составляет 0,86, во втором 0,89.

Исходя из наблюдающихся в этих районах различий запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы весной около 100 мм можно считать, что только за счет этого фактора урожаи указанных выше сортов озимой пшеницы в черноземной зоне Европей-

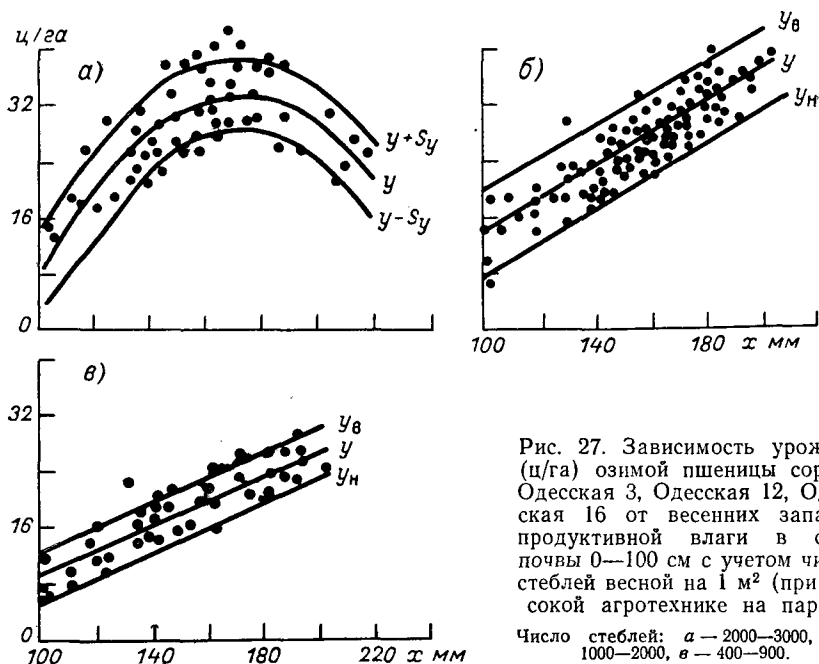


Рис. 27. Зависимость урожая (ц/га) озимой пшеницы сортов Одесская 3, Одесская 12, Одесская 16 от весенних запасов продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см с учетом числа стеблей весной на 1 м<sup>2</sup> (при высокой агротехнике на пару).

Число стеблей: а — 2000—3000, б — 1000—2000, в — 400—900.

ской территории СССР могут отличаться от года к году на 20 ц/га и более.

В последние годы в основных районах возделывания озимой пшеницы на Украине, Северном Кавказе, в Центрально-Черноземной зоне, в Молдавии почти вся посевная площадь стала засеваться новыми, более урожайными, сортами: Безостая 1 и Миrowsкая 808. Е. С. Улановой были установлены соответствующие связи для этих более урожайных сортов пшеницы, притом уже применительно к их среднеобластным урожаям [227]. Установленные зависимости показали, что как и для прежних сортов, два упомянутых выше фактора — запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы весной и число сохранившихся после перезимовки стеблей — являются главными факторами урожайности.

Уравнение связи среднеобластных урожаев озимой пшеницы Безостая 1 и Мироновская 808 с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы имеет вид

$$y = ax^2 + bx + c. \quad (84)$$

Значения параметров этого уравнения представлены в табл. 48.

Таблица 48

Значение параметров в уравнении  $y = ax^2 + bx + c$  для озимой пшеницы Безостая 1 и Мироновская 808

Число стеблей на 1 м <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>S<sub>y</sub></i> , ц/га	$\eta$
Связь с запасами влаги весной					
500—1000	—0,001	+0,382	—13,0	2,8	0,81
1000—1800	—0,001	+0,370	—8,65	2,1	0,79
Связь с запасами влаги в фазу выхода в трубку					
500—1000	—0,0021	+0,715	—35,75	2,5	0,84
1000—1800	—0,0027	+0,88	—45,0	2,3	0,71
Связь с запасами влаги в начале колошения					
400—600*	—0,0013	+0,317	+4,24	2,5	0,76
600—1200*	—0,0011	+0,26	+10,71	2,3	0,70

Примечание. Звездочкой (\*) отмечены колосonoсные стебли.

Приведенные в табл. 48 количественные зависимости среднеобластных урожаев озимой пшеницы вновь районированных сортов Безостая 1 и Мироновская 808 от запасов продуктивной влаги в почве позволяют составлять долгосрочные прогнозы урожаев пшеницы с заблаговременностью в 3, 2 и 1 месяц.

Для получения количественных показателей обеспеченности влагой кукурузы, площади которой в настоящее время достигают огромных размеров, в том числе и в совершенно новых для нее районах, могут быть использованы в основном результаты специально проведенных полевых исследований и наблюдений сети агро- и гидрометеостанций за последние годы.

Результаты исследований в засушливых районах Казахстана и Кулунды позволили установить, что условия водоснабжения кукурузы сильно влияют не только на рост, но и на темпы ее развития, особенно в период формирования репродуктивных органов [126, 235]. У плохо обеспеченных влагой посевов задержка в наступлении отдельных фаз достигает 20 дней и более.

Количественные связи между условиями водоснабжения и суммой температур, необходимой среднеспелым сортам кукурузы (типа Днепропетровская) для прохождения фазы выход в труб-

ку—выметывание султана и выход в трубку—появление нитей початков, когда кукуруза особенно требовательна к воде, представлены следующими уравнениями [126]:

$$\Sigma t_1 = -2,9 W_1 + 737, \quad (85)$$

$$r = -0,89 \pm 0,04, \quad E_{50} = \pm 37,$$

$$\Sigma t_2 = -3,3 W_2 + 1093, \quad (86)$$

$$r = -0,91 \pm 0,04, \quad E_{50} = \pm 37.$$

В этих уравнениях  $\Sigma t_1$  — сумма положительных температур за период выход в трубку—выметывание султана,  $\Sigma t_2$  — сумма положительных температур за период выход в трубку—появление нитей початка,  $W_1$  — средние за период выход в трубку—выметывание султана запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см (мм),  $W_2$  — средние за период выход в трубку—появление нитей початка запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см (мм).

По исследованиям Ю. И. Чиркова [244], проведенным в основном на Европейской территории СССР, значение недостатка влаги как фактора, тормозящего развитие, проявляется лишь при запасах продуктивной влаги менее 40 мм в метровом слое. При значительном иссушении почвы выметывание метелки задерживается на 4—6 дней по сравнению с обеспеченными влагой посевами. Зависимость продолжительности периода выметывание метелки — появление нитей початка наиболее распространенных среднепоздних и среднеспелых сортов кукурузы  $z$  имеет вид

$$z = 0,6t - 0,15y + 4,4, \quad (87)$$

где  $t$  — средняя температура воздуха,  $y$  — запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0—50 см.

Отмеченные особенности связи темпов развития с условиями водоснабжения для кукурузы имеют очень важное значение, поскольку торможение развития задерживает образование початков и тем самым снижает качество продукции, особенно при уборке кукурузы на силос. Это особенно следует отметить в отношении засушливых районов Казахстана и Кулунды, где недостаток влаги в почве — частое явление и где кукуруза возделывается главным образом на силос.

Влияние условий водоснабжения на рост кукурузы в отдельные периоды ее развития весьма неоднородно. Большинство исследователей отмечает, что в период всходы—выход в трубку надземная масса кукурузы растет очень медленно и потребность растений во влаге невелика [68, 110, 164, 205]. Исследования Центрального института прогнозов [126] в степных районах Казахстана и Кулунды показали, что в этот период линейный рост надземной массы идет очень медленно и равномерно. При этом четкой зависимости прироста кукурузы в высоту от увлажнения и температуры воздуха не обнаруживается. При запасах продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см в пределах 10—40 мм и в слое 0—50 см в пределах

30—90 мм при среднесуточных температурах воздуха 12—20° С прирост кукурузы в высоту колеблется незначительно и составляет 10—15 см в декаду.

Период выход в трубку—выметывание султана характеризуется резким возрастанием интенсивности роста кукурузы и потребности ее в воде, что связано с началом формирования репродуктивных органов [115]. К этому времени корневая система кукурузы проникает в более глубокие слои почвы и в водном питании участвует весь метровый слой. В засушливых районах Казахстана и Кулунды с сильно выхолаженными почвами влага более глубоких слоев (100—150 см) практически не использовалась растениями и оставалась на одном уровне в течение всего периода их вегетации (табл. 49).

Таблица 49

**Запасы продуктивной влаги в начале и в конце вегетации кукурузы в слое почвы 100—150 см. Ст. Шортанды Целиноградской области**

Год	Сорт	Количество растений (тыс. на 1 га)	Запасы влаги (мм)	
			в начале вегетации	в конце вегетации
1955	Краснодарский	40	26	20
	1/49	80	23	20
1956	ВИР-42	40	26	27
1957	ВИР-42	40	70	73
1957	ВИР-42	80	63	63

В период трубка—выметывание чем больше запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы, тем интенсивнее прирост кукурузы в высоту и тем больше высота растений ко времени выметывания султана (табл. 50). В соответствии с худшими условиями водоснабжения растений на участках с малыми влагозапасами наблюдается и плохое состояние растений (высохшие листья, сильное их скручивание).

Таблица 50

**Линейный прирост кукурузы в период выход в трубку—выметывание султана при различных запасах влаги в почве. Ст. Шортанды Целиноградской области**

Год	Линейный прирост кукурузы за декаду (см)	Высота растений ко времени выметывания султана (см)	Запасы продуктивной влаги (мм), средние за период выход в трубку—выметывание в слое почвы (см)	
			0—50	0—100

**Выход в трубку — выметывание**

1955	16	107	27	51
1956	22	129	30	59
1957	29	156	61	123

Период выметывание — появление нитей початка характеризуется особенно большой потребностью в воде, а вследствие этого и неравномерностью линейного роста. Литературные данные относительно сроков прекращения интенсивного роста кукурузы весьма противоречивы. По мнению одних исследователей [155], он ограничен фазой выметывания, по мнению других [110, 222] — цветением. Некоторые же [205] считают, что интенсивный рост продолжается до молочной спелости початков.

Относительно влияния агрометеорологических условий на рост кукурузы в период выметывание — появление нитей данных в литературе также очень мало. Известно, что кукуруза исключительно требовательна в это время к влаге: период 10 дней до выметывания — 20 дней после выметывания некоторыми исследователями признан критическим. И. Н. Гудков [52] указывает, что почвенная засуха в период цветения увеличивает разрыв между цветением мужских и женских соцветий, сокращает период цветения мужских соцветий и вызывает их стерильность. Однако, при каких запасах влаги происходят эти явления, он не отмечает. По данным И. В. Анджапаридзе [10], снижение запасов влаги до 50% ПВ в слое 0—70 см всегда тормозит процессы роста и развития.

По наблюдениям Любомудровой в Казахстане, в период выметывание — появление нитей початка рост растений тесно связан с условиями увлажнения почвы. Так, на полях с недостаточными запасами влаги (15—30 мм в метровом слое) рост кукурузы практически прекращается еще до начала выметывания и во время него, на полях же с запасами 50 мм и более он останавливался лишь после начала цветения.

Интенсивность линейного прироста среднепозднеспелых сортов (типа ВИР-42) в период выметывание — появление нитей початка в различные по условиям водоснабжения годы представлена в табл. 51.

Таблица 51

**Линейный прирост кукурузы в период выметывание — появление нитей початка при различных запасах влаги в почве. Ст. Шортанды Целиноградской области**

Год	Линейный прирост кукурузы за декаду (см)	Высота растений ко времени появления нитей початка (см)	Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы, средние за период выметывание — появление нитей (мм)
1955	12	112	48
1956	12	133	31
1957	30	191	141

Как следует из данных этой таблицы, в годы с достаточными запасами влаги в почве (140 мм в метровом слое) интенсивность среднедекадного линейного прироста растений в период выметывание — появление нитей початков в 2,5 раза превышает прирост



в годы с недостаточными влагозапасами (менее 50 мм в метровом слое).

Не менее тесная зависимость существует между запасами продуктивной влаги в почве и урожаями зеленой массы кукурузы. По исследованиям Любомудровой в Казахстане, в благоприятном по увлажнению 1957 г. средний вес одного растения был в три раза больше, чем в засушливом 1955 г. Соответственно во столько же раз был выше и урожай. В 1956 г., характеризующемся благоприятными условиями водоснабжения в первую часть вегетационного периода и неблагоприятными во вторую, средний вес одного растения был примерно в 1,5 раза больше, чем в засушливом 1955 г., и в два раза меньше, чем во влажном 1957 г. Примерно такие же соотношения отмечены и для урожаев (табл. 52).

Таблица 52

**Средний вес растений и урожай зеленой массы кукурузы в различные по условиям водоснабжения годы.  
Ст. Шортанды Целиноградской области**

Годы	Средний вес одного растения (г)	Урожай зеленой массы (ц/га)
1955	230	90
1956	320	130
1957	690	280

Ю. И. Чирковым [244] установлены уравнения связи веса растений с запасами продуктивной влаги в слое почвы 0—50 см и суммой эффективных температур  $>10^{\circ}\text{C}$  в период всходы—выметывание. Они представлены в табл. 53.

Таблица 53

**Связь веса  $y_1$  и листовой поверхности растений  $y_2$  с суммой эффективных температур  $x$  в период всходы—выметывание при различных запасах продуктивной влаги в почве**

Запасы продуктивной влаги (мм) в слое 0—50 см	Уравнение регрессии	$r$
---	---------------------	-----

Вес растений (г)

$>60$	$y_1 = 0,0024x^2 - 0,40x + 20,4$	0,81
30—60	$y_1 = 0,0020x^2 - 0,44x + 27,6$	0,83
20—30	$y_1 = 0,0015x^2 - 0,45x + 37,1$	0,78

Листовая поверхность (дм<sup>2</sup>)

$>60$	$y_2 = 0,0016x^2 - 0,012x + 0,22$	0,80
30—60	$y_2 = 0,0014x^2 - 0,013x + 0,41$	0,84
20—30	$y_2 = 0,0001x^2 - 0,016x + 0,60$	0,81

В этой таблице даны также связи листовой поверхности с указанными факторами, поскольку листовая поверхность является важнейшим показателем продуктивности растений и обеспеченности их влагой. Приведенные уравнения обнаруживают большое соответствие роста площади листьев весу растений. Из анализа этих уравнений следует, что наилучшие условия для формирования урожаев растительной массы кукурузы создаются при запасах продуктивной влаги в слое 0—50 см, больших 60 мм, и при среднедекадной температуре воздуха, равной 20—24°С. В этих условиях при среднем уровне агротехники на 1 дм<sup>2</sup> листовой поверхности накапливается 10—12 г растительной массы за декаду.

Связь хозяйственного урожая зерна кукурузы с запасами продуктивной влаги в почве при различной листовой поверхности, по исследованию Чиркова, может быть выражена уравнениями регрессии, приведенными в табл. 54.

Таблица 54

Связь хозяйственного урожая зерна кукурузы  $y$   
с запасами продуктивной влаги в слое почвы 0—50 см  
в декаду наступления фазы выметывания метелки  $x$   
при различной листовой поверхности

Уравнение регрессии	Листовая поверхность (тыс. м <sup>2</sup> /га)	$r$	Ошибка уравнения (ц/га)
$y = 0,191x + 7,96$	5—8	0,83	$\pm 2,55$
$y = 0,360x + 8,90$	9—16	0,81	$\pm 5,78$
$y = 0,448x + 12,07$	17—24	0,80	$\pm 7,40$

Высокие коэффициенты корреляции (0,80—0,83) дают основание применять указанные уравнения для оценки влагообеспеченности кукурузы и использовать их в прогностических целях.

**Оценка влагообеспеченности трав.** Для получения показателей обеспеченности влагой многолетних сеяных трав были использованы сетевые наблюдения агро- и гидрометеостанций и результаты полевых опытов Центрального института прогнозов [132]. Исследования проводились по люцерне и красному клеверу.

Люцерна является, с одной стороны, влаголюбивым растением, с другой — засухоустойчивым. Люцерна весьма требовательна к воде и в нормальных условиях произрастания развивает громадную надземную массу. Урожай люцерны находится почти в прямой зависимости от степени обеспеченности ее почвенной влагой. В условиях неполивного хозяйства в районах недостаточного увлажнения она дает один-два укоса с общей массой сена 15—20 ц/га; в более же благоприятных условиях увлажнения урожай сена достигает 50 ц/га.

Орошение повышает как число укосов люцерны, так и урожай. По данным Валуйской мелиоративной опытной станции, при обильном поливе урожай люцерны был 180 ц/га, без полива — всего

24 ц/га. В то же время люцерна может быть отнесена к числу засухоустойчивых растений [47]. В сухие годы она дает более высокие и устойчивые урожаи по сравнению с другими травами. В литературе часто приводятся факты сохранения жизнедеятельности люцерны при полном и часто довольно длительном отсутствии продуктивной влаги в метровом слое почвы.

Засухоустойчивость люцерны в основном обусловливается мощным развитием корневой системы, проникающей на большую глубину (2—5 м) и очень разветвленной, благодаря чему люцерна, во-первых, наиболее полно использует всю доступную почвенную влагу, во-вторых, живет за счет влаги более глубоких почвенных слоев, не осваиваемых другими растениями с менее глубокой корневой системой. Способность люцерны добывать влагу из глубоких почвенных слоев ставит ее в меньшую зависимость от условий погоды, делает ее засухоустойчивой.

Люцерна расходует влагу в течение всего вегетационного периода, однако с различной интенсивностью в отдельные его отрезки.

Уже с начала вегетационного периода люцерна второго года и последующих лет жизни благодаря глубокой корневой системе использует влагу метрового слоя, а по мере иссушения почвы — и более глубоких слоев. Так, по данным Института зернового хозяйства Юго-Востока, корневая система люцерны проникает на глубины свыше 200 см, причем для нее характерно боковое ветвление корней, обуславливающее использование влаги в горизонтальном направлении [28].

О степени использования влаги люцерной в горизонтальном направлении можно судить по результатам опытов Безенчукской агрометеорологической станции. В этих опытах влажность почвы определялась непосредственно в травостое люцерны и на освобожденной от нее площадке внутри поля, постоянно очищаемого от сорняков, на расстоянии 25, 50 и 100 см от травостоя (табл. 55). Приведенные данные показывают, что люцерна интенсивно расходует влагу в горизонтальном направлении на расстоянии 25 см, а на расстоянии 1 м использование влаги более слабое. Благодаря мощной развитой корневой системе и большой надземной массе растений реакция люцерны на изменение условий увлажнения замедлена. Нужны резкие изменения в увлажнении, чтобы вызвать существенные изменения в состоянии травостоя.

При сопоставлении оценок травостоя за предшествующую и текущую декады со средними запасами влаги метрового слоя почвы за те же декады получены следующие результаты.

1. Плохая оценка состояния травостоя (2 балла) может перейти только в удовлетворительную и только при довольно высоких запасах влаги, не ниже 90 мм в метровом слое.

2. Удовлетворительная оценка состояния травостоя (3 балла) при малых запасах влаги в почве (меньше 40 мм в метровом слое) может снизиться (в среднем с 3,0 до 2,6), а при более высоких запасах (больше 60 мм) — несколько повыситься.

Запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под люцерной и на оголенной площадке на различных расстояниях от травостоя.  
Ст. Безенчук, 1949 г.

Место определения влажности почвы	Срок определения			
	при закладке оголенной площадки (12 V)	бутони-зация (24 V)	первый укос (4 VI)	второй укос (6 VII)
Травостой . . . . .	86	46	14	1
Оголенная площадка в удалении от травостоя				
на 25 см . . . . .	86	81	42	8
на 50 см . . . . .	86	75	71	40
на 100 см . . . . .	86	90	76	27

3. Хорошая оценка (4 балла) несколько снижается при запасах влаги меньше 40 мм, при высоких запасах (100 мм и более) состояние травостоя может улучшиться до отличного.

4. Отличная оценка (5 баллов) сохраняется лишь при запасах влаги больше 50 мм в метровом слое.

Таким образом, оценки состояния травостоя оказываются более или менее устойчивыми.

Клевер красный, как и люцерна, обладает мощно развитой и разветвленной корневой системой [84, 120]. Он возделывается во всех областях нечерноземной зоны и в северных областях черноземной зоны, характеризующихся высоким стоянием почвенно-грунтовых вод. В более южных районах, в открытой степи, клевер плохо зимует, кроме того, в течение вегетационного периода он страдает здесь от недостатка влаги, в связи с чем в этих районах он заменяется более засухоустойчивой люцерной.

Результаты сопоставлений оценок состояния клевера первого и второго года укоса с запасами продуктивной влаги не дали явно выраженной зависимости. Это объясняется тем, что клевер возделывается преимущественно в районах, где в течение почти всего вегетационного периода запасы влаги в нижних слоях сохраняются на довольно высоком уровне и почвенные засухи бывают редко.

Кроме того, благодаря глубокой и разветвленной корневой системе клевер может без особого ущерба вынести кратковременный недостаток воды, в отличие от большинства зерновых однолетних культур с менее развитой корневой системой. Так, вегетационный период 1948 г. в Московской области (ст. Немчиновка) характеризовался засушливыми условиями: под клевером в слое почвы 0—20 см запасы продуктивной влаги снижались до 3 мм, а в слое 0—50 см — до 26 мм. Такие низкие запасы влаги имели место в продолжение почти всего июня. Несмотря на это, клевер третьего года жизни, имеющий глубоко идущую корневую систему и пользующийся влагой из этих слоев, не проявлял внешних признаков

угнетения от недостатка влаги и состояние травостоя не ухудшилось. В то же время молодой, хорошо развитый клевер первого года жизни, корневая система которого была еще слабо развита и не проникала глубже 30 см, очень страдал от засухи и у него имело место даже устойчивое увядание и гибель отдельных растений, несмотря на то что в слое почвы 0—30 см в конце июня было еще 10—15 мм продуктивной влаги. Из этого можно сделать вывод, что условия водоснабжения резко сказываются лишь на клевере первого года жизни. При большом снижении запасов почвенной влаги у клевера в этом возрасте может наблюдаться гибель и изреживание растений, что отражается на продуктивности клевера в последующие годы его жизни и сильно снижает урожай.

**Оценка влагообеспеченности естественного травостоя.** Роль запасов почвенной влаги в формировании урожаев естественного травостоя в различных природных зонах может быть охарактеризована на основе монографии А. П. Федосеева «Климат и пастбищные травы Казахстана» [234].

В зонах с промывным водным режимом почв (лесная) связь продуктивности травостоя с влажностью почвы слабая. В зонах периодически промывного водного режима почв (лесостепная) связь урожая с запасами почвенной влаги в период вегетации растений заметно выявлена. В зонах с непромывным водным режимом почв (степь, полупустыня) ярко выражена связь урожая пастбищной растительности с запасами влаги в почве весной и с глубиной промачивания почв. Для местообитания растений свыпотным типом водного режима почв (поймы рек, низины и др.) характерно наличие связей урожаев естественного травостоя с глубиной стояния уровней почвенно-грунтовых вод.

В условиях непромывного типа водного режима почв возобновление вегетации многолетних растений весной из-за недостатка влаги в почве задерживается редко, лишь при полном отсутствии продуктивной влаги в почве. Для эфемерно-полынных пастбищ южного Прибалхашья корреляционная связь урожая  $u$  (ц/га) с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм) в первую весеннюю декаду с температурой воздуха  $10^{\circ}\text{C}$  ( $x$ ) представлена уравнением

$$u = 0,046x + 0,237, \quad (88)$$

$$r = 0,82, \quad E_{\varepsilon_0} = \pm 1,16.$$

В сухих зонах Казахстана и Средней Азии прирост сухой массы злаково-полынных травостоев прекращается, когда расходы влаги из почвы за декаду снижаются до 10 мм и менее и продуктивной влаги в почве практически не остается.

Основным фактором, определяющим отрастание трав в засушливых районах Казахстана, является их влагообеспеченность. Отавы удовлетворительно отрастают в тех случаях, если суммарные расходы влаги метрового слоя почвы за декаду составляют не менее 20 мм.

Летнее выгорание пастбищ (усыхание вегетативных частей пастбищных растений) происходит в результате сочетания недостатка влаги в почве с засушливыми явлениями в атмосфере (высокие температуры и дефициты влажности воздуха). Начало выгорания эфемерной растительности приходится на декаду с запасами влаги в слое почвы 0—20 см ниже 10 мм, а глубоко укореняющихся злаково-разнотравных травостоев — при снижении запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы до 25 мм и менее, при одновременных явлениях засушливости в атмосфере. По многолетним наблюдениям ст. Айдарлы (Прибалхашье), выгорание эфемеров начинается в декаду с запасами влаги в слое почвы 0—20 см менее 10 мм при среднесуточной температуре воздуха  $\geq 18^{\circ}\text{C}$  и дефиците влажности воздуха  $\geq 10$  мм.

Злаково-разнотравные пастбища степей и полупустынь начинают выгорать в декаду, когда запасы влаги в метровом слое почвы снижаются до 25 мм, а среднедекадная температура воздуха составляет не менее  $20^{\circ}\text{C}$ .

Исследования, проведенные по элементам рельефа в Чемолганском Логу, показали, что выгорание пастбищной растительности практически нацело определяется влажностью почвы. При запасах продуктивной влаги в метровом слое более 39 мм злаково-разнотравный травостой оставался зеленым. Начало выгорания отдельных растений (10% всей площади) отмечалось при уменьшении запасов до 32 мм, массовое выгорание — при запасах 24—26 мм. Даже на южном склоне в микропонижениях, где запасы влаги составляли 52 мм, растения оставались зелеными, в то время как на остальной площади этого склона, с запасами влаги 26 мм, они выгорели.

В летний период, после приостановки роста вследствие засушливости, с выпадением осадков может иметь место энергичное отрастание растений. Однако при понижении запасов продуктивной влаги ниже 10 мм выгорание растений возобновляется.

Для осеннего отрастания хозяйственно ценных травостоев благоприятные условия на суглинистых пастбищах наблюдаются в декады с запасами продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см не менее 10 мм при средних температурах воздуха не ниже  $5^{\circ}\text{C}$  для северной части Казахстана и  $4^{\circ}\text{C}$  для южной.

Валовые урожаи пастбищной растительности (за весь период вегетации в целом) на территории сухих зон Казахстана и Средней Азии наиболее тесно связаны с влагозапасами в почве, накопившимися к весне. Весенние запасы являются решающим фактором произрастания пастбищной растительности в последующий период. Связи валового урожая пастбищной растительности с весенними запасами продуктивной влаги в метровом слое почв различных типов пустынь и полупустынь представлены на рис. 28. Эти связи широко используются при составлении агрометеорологических прогнозов урожая пастбищной растительности.

**Оценка влагообеспеченности картофеля.** При разработке метода оценки влагообеспеченности картофеля были использованы

исследования Института картофельного хозяйства (ИКХ) и данные небольшого числа гидрометеостанций, ведущих наблюдения над приростом ботвы и клубней картофеля [168].

Обработка материалов ИКХ (расположен в условиях супесчаных почв) показала, что между приростами клубней картофеля и запасами влаги имеется довольно тесная связь, причем для первого периода намечается более четкая зависимость от запасов

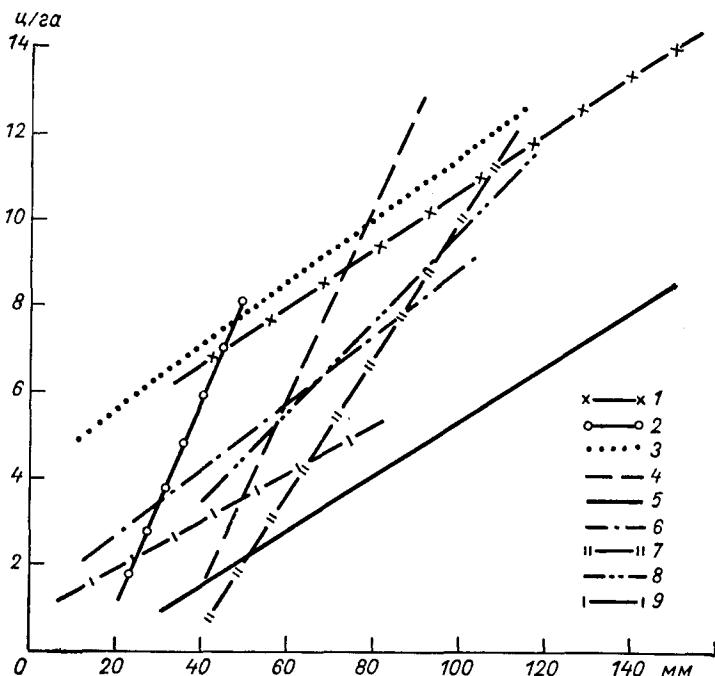


Рис. 28. Связь валового урожая пастбищной растительности (ц/га) с весенними запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм).

1 — комплексная полупустыня (Джаныбек Казахской ССР), 2 — злаково-полынная пустыня (Калмыково Казахской ССР), 3 — злаково-полынная песчаная пустыня (Нарын-Худук Калмыцкой АССР); 4 — полынно-боялычевая пустыня (Бетпак-Дала Казахской ССР), 5 — эфемерно-полынная предгорная пустыня (Айдарлы Казахской ССР), 6 — эфемерно-полынная предгорная пустыня (Бозой Казахской ССР), 7 — эфемерно-полынная песчаная пустыня (Жеты-Жол Казахской ССР), 8 — эфемерно-кустарниковая песчаная пустыня (Орн-Басар Казахской ССР), 9 — то же (Бузаубай Узбекской ССР).

влаги в слое 0—20 см, а для периода после цветения — от запасов влаги в слое 0—50 см. Это объясняется тем, что после цветения глубина проникновения корней картофеля достигает наибольшего значения и прироста могут быть большими, если даже в верхних слоях почвы влаги очень мало.

Зависимость прироста от температуры воздуха и влажности почвы в период от цветения до увядания ботвы представлена на рис. 29. Из анализа рисунка видно, что наибольший прирост в пе-

риод после цветения на супесчаных почвах наблюдается при запасах влаги в слое 0—50 см, равных 60—70 мм, и при среднедекадных температурах 16—18°С. Ведущим фактором, определяющим прирост, являются запасы влаги, температура играет роль только при хорошем увлажнении.

Помимо данных ИКХ о приросте картофеля на супесчаных почвах, были обработаны аналогичные наблюдения на суглинистых почвах центральной части Европейской территории СССР (всего 55 годостанций).

Сравнение прироста картофеля на супесчаных и суглинистых почвах показало, что основные закономерности связи прироста картофеля с запасами влаги и температурой воздуха в обоих случаях примерно одинаковы, поэтому при оценке условий произрастания картофеля на супесчаных и суглинистых почвах можно пользоваться одной общей зависимостью, выразив запасы продуктивной влаги в процентах полевой влагоемкости. Так как абсолютные значения прироста клубней зависят не только от метеорологических условий, но и от очень многих причин, в частности от фона удобрений, качества семенного материала и других агротехнических приемов, целесообразно выразить значение прироста клубней картофеля также не в абсолютных единицах (т/га), а в виде отношения к приросту, наблюдаемому при оптимальных метеорологических условиях.

Для того чтобы учесть длительность периода клубнеобразования, оценка условий формирования урожая картофеля выражается в условных единицах: прирост за сутки при оптимальных условиях принимается за единицу (100%).

При высокой агротехнике, применяемой в научных учреждениях и передовых хозяйствах, цена условной единицы прироста равна 6—7 ц/га, а на полях со средним уровнем агротехники — 3—4 ц/га.

Малый вес ботвы ограничивает прирост клубней картофеля даже при благоприятных условиях погоды. При весе же ботвы к моменту цветения 18—20 ц/га ведущими факторами, определяющими прирост клубней, являются запасы влаги в почве и температура.

Ботва картофеля быстро реагирует на изменение метеорологических условий, и прирост ее при благоприятной погоде

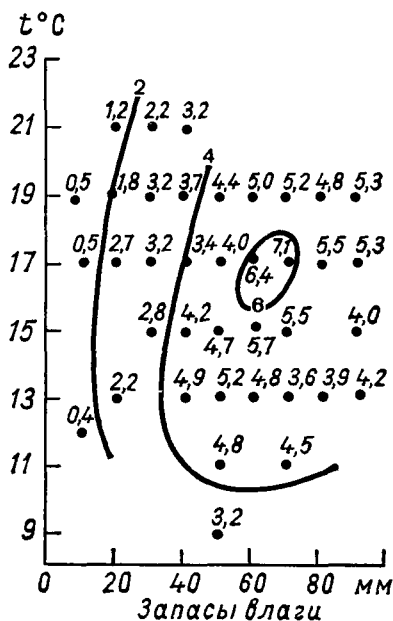


Рис. 29. Прирост клубней картофеля за декаду (т/га) в период от цветения до увядания ботвы при различной средней за декаду температуре воздуха и различных запасах продуктивной влаги в слое почвы 0—50 см. Данные ИКХ.



на достаточно удобренной почве может достигать 10 ц/га и более за декаду. Поэтому, если в период до начала клубнеобразования условия для роста ботвы были неблагоприятны, а затем они улучшились, ботва на хорошо удобренных почвах быстро достигает веса 15—20 ц/га и не ограничивает в дальнейшем прирост клубней.

Сопоставление веса ботвы к началу цветения с ходом влажности почвы по декадам в предшествующий период показало, что если в течение 4 декад после всходов запасы продуктивной влаги в слое 0—20 см не были меньше 20 мм, что для суглинистых почв составляет примерно 40% влагоемкости, то снижения прироста клубней картофеля из-за малого веса ботвы не происходит. Если же в период от всходов до цветения в одну или несколько декад влажность почвы была меньше 40% влагоемкости, то может наблюдаться снижение урожая картофеля из-за малого веса ботвы даже при благоприятных условиях в период клубнеобразования. Ориентировочно можно считать, что если после всходов влажность почвы в слое 0—20 см была меньше 40% НВ в течение одной декады, то снижение оценки условий формирования урожая картофеля составит 5%, в течение 2 декад — 10%, 3 декад — 20%, 4 декад — 30%. На соответствующую величину снижается ежедекадная оценка условий формирования урожая, полученная на основе учета погодных условий в период клубнеобразования.

**Оценка влагообеспеченности молодых дубков.** В засушливых районах СССР для улучшения водного режима почв большое значение имеют полезавитные лесные полосы. Однако их выращивание из-за той же сухости представляет большие трудности, особенно для таких ценных пород, как дуб.

Исследования, проведенные Центральным институтом прогнозов и другими подразделениями Гидрометслужбы, показали, что гибель дубков от засухи нередко происходит еще в период прорастания желудей [176, 178]. При уменьшении запасов продуктивной влаги в верхнем двадцатисантиметровом слое почвы до 5—10 мм всходы не появляются, желуди гибнут на 100%, при запасах 10—20 мм всходы сильно запаздывают, бывают нежизнеспособны и гибнут при малейших неблагоприятных условиях погоды. Снижение запасов продуктивной влаги до 5—10 мм в полуметровом и до 25—30 мм в метровом слоях почвы резко ухудшает состояние дубков одного-двухмесячного возраста, а при отсутствии осадков вызывает и полную их гибель (табл. 56). Реакция дубков на засуху в более позднем возрасте не сразу уловима в силу их способности давать взамен погибших все новые и новые побеги из спящих почек. Однако можно считать установленным, что при снижении запасов влаги в почве до указанных выше пределов дубки не формируют нормальных почек и резко снижают свою жизнеспособность.

Заморозки, суховеи и высокие температуры воздуха в период вегетации обычно повреждают лишь надземные части дубков (стебли, листья, почки) и не являются причиной гибели всего растения в целом. Последняя наблюдается лишь в случаях, когда

**Запасы продуктивной влаги (мм) в почве и исход перезимовки дубков, посеянных гнездовым способом зимой 1951-52 г. Заволжье**

Влажность почвы и состояние дубков	Под сплошным покровом			В коридорах		На чистом пару
	яровой пшеницы	подсол-нечника	проса	среди яровой пшеницы	среди проса	
Запасы продуктивной влаги (мм) в период формирования почек в слое почвы						
0—50 см . . . . .	1	2	2	6	7	30
0—100 см . . . . .	14	5	18	24	24	73
0—150 см . . . . .	48	31	61	63	71	190
Дубки, не заложившие нормальных почек (%) . . . . .	100	90	60	85	65	5
Погибшие дубки (%) по учету на 16 V 1952 г. . . . .	100	94	86	70	94	18
То же на 31 V 1952 г. . . . .	100	97	99	94	98	54

дубки молодого возраста (первого и второго года жизни) сильно ослаблены неблагоприятными условиями предшествующего периода, главным образом недостатком влаги в почве. В этих случаях губительными для дубков можно считать: а) заморозки в воздухе  $-2^{\circ}\text{C}$  и ниже и на поверхности почвы  $-4^{\circ}\text{C}$  и ниже; б) суховеи с относительной влажностью воздуха 20% и ниже с температурой  $30^{\circ}\text{C}$  и выше; в) высокие температуры ( $55^{\circ}\text{C}$  и выше) на поверхности почвы.

Перечисленные условия погоды при плохом предшествующем состоянии дубков могут вызвать их отпад в количестве 5—10%.

**Значение типа почвы и удобрений для влагообеспеченности сельскохозяйственных культур.** При исследовании вышеприведенных связей состояния сельскохозяйственных культур и условий формирования урожаев с запасами продуктивной влаги и суммарными ее расходами следует учитывать значение типа почвы и удобрений.

Условия влагообеспеченности сельскохозяйственных культур на легких и тяжелых почвах не идентичны. Песчаные и супесчаные почвы легко отдают воду даже при низкой сосущей силе растений, в результате чего запасы влаги на таких почвах оказываются быстро израсходованными. Суглинистые и глинистые почвы отдают воду постепенно во всем интервале сосущей силы, до величин близких к влажности устойчивого завядания ( $\approx -15$  атм). В таких почвах при низкой сосущей силе растений освобождается только небольшая часть продуктивной влаги. Это несколько затормаживает этапы вегетационного роста, но зато влага длительно сохраняется в почве для дальнейшего роста и созревания культуры.

Ярким примером скорости расходования влаги супесчаными и суглинистыми почвами могут служить данные табл. 57 [185].

**Скорость расходования воды (мм/сутки) орошаемыми зерновыми культурами на полях с легкими и тяжелыми почвами при одних и тех же условиях погоды**

Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм)	Яровая пшеница (период выход в трубку—восковая спелость)		Кукуруза (период выход в трубку—молочная спелость)		Разница	
	супеси	суглинки	супеси	суглинки	яровая пшеница	кукуруза
70	4,4	3,4	2,6	1,5	1,0	1,1
100	5,8	4,3	4,0	2,4	1,5	1,6
130	7,2	5,2	5,5	3,2	2,0	2,3
160	8,6	6,1	6,9	4,2	2,5	2,7

Из этой таблицы следует, что различия в скорости расходования воды практически не зависят от вида возделываемых растений: под культурой сплошного сева — яровой пшеницей — они таковы же, как и под пропашными культурами — кукурузой. Влияние же степени увлажнения почвы на различие скорости расходования воды суглинистыми и супесчаными почвами очень сильно. Чем выше запасы влаги в почве, тем разница в скорости расходования воды между супесчаными и суглинистыми почвами больше. При запасах влаги в метровом слое почвы около 70 мм различия составляют 1,0—1,1 мм, при запасах влаги, близких к наименьшей влагоемкости (160 мм), они возрастают до 2,5—2,7 мм/сутки.

На эффективности использования запасов почвенной влаги существенно сказываются удобрения. На удобренных полях, как правило, влага используется более продуктивно, поскольку растения тратят на создание единицы сухого вещества тем меньше воды, чем полнее удовлетворены их требования к другим факторам жизни, в том числе и к фактору питания.

Объясняется это тем, что транспирация и поступление питательных веществ в растение в известной степени независимы друг от друга. При недостатке питательных веществ некоторое количество воды растения испаряют непроизводительно, так как в этом случае процессы синтеза органического вещества лимитируются недостатком питательных веществ.

Использование минеральных удобрений эффективно, однако, только в определенных пределах влажности почвы. При влажности, большей влагоемкости почвы, содержащиеся в удобрениях питательные вещества выносятся из корнеобитаемого слоя в более глубокие горизонты, а иногда и в грунтовые воды вместе с потоком просачивающейся туда воды. При остром недостатке влаги удобрения действуют очень слабо или не действуют совсем, а при определенных пределах увлажнения оказывают даже вредное воздействие на рост и урожай сельскохозяйственных культур.

Непостоянство действия минеральных удобрений в связи с режимом влажности почвы, по данным многочисленных опытов, на-

блюдаются во всех почвенно-климатических зонах СССР. Однако материалы по количественной характеристике связи между запасами влаги в почве и эффективностью удобрений, столь необходимые для обоснования доз, сроков и способов их внесения в различных почвенно-климатических зонах и в различные по метеорологическим условиям годы, крайне ограничены.

М. С. Кулик [113] считает, что оптимальные условия для использования минеральных удобрений соответствуют запасам 15—20 мм продуктивной влаги в каждом десятисантиметровом слое почвы. Запасы же продуктивной влаги в пахотном слое (0—20 см) меньше 10 мм являются показателем невозможности их эффективного действия.

## Глава IX

### ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА РАБОТУ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН И ОРУДИЙ

В основу методики оценки влияния влажности почвы на производительность и качество работ почвообрабатывающих машин и орудий положено представление о том, что основным фактором производительности является сопротивление почвы орудиям обработки.

#### Сопротивление почвы

Сопротивление почвы обрабатывающим орудиям можно рассматривать как интегральный эффект сцепления частиц почвы, пластичности почвенной массы, трения между металлом рабочих органов почвообрабатывающих орудий и почвой и трения между частицами самой почвы.

Хайнес показал, что кривые изменения сцепления и пластичности в зависимости от содержания влаги в почве имеют такой же ход, как и кривые динамометрических измерений, применяемых при учете тяговых усилий [91].

Сцепление почвы во влажном ее состоянии определяется давлением водяной пленки, а в сухом состоянии — собственным сцеплением почвы. В последнем случае частички почвы представляются как бы сцементированными друг с другом. Это сцепление называют истинным сцеплением. Истинное сцепление представляет собой физическое свойство массы твердых частиц почвы, является функцией формы, величины зерен, а также давления, вызывающего увеличение площади контакта на единицу объема, а тем самым увеличение начального трения.

Истинное сцепление незначительно. Если исключить действие поверхностного натяжения в связанных грунтах (под водой), то их сопротивление почти тождественно сопротивлению песков, лишенных связности. Наблюдаемые величины сопротивления срезу даже уплотненного грунта под водой не превышают  $20 \text{ г/см}^2$ . В грунтах же, поверхность которых соприкасается с воздухом, сопротивление срезу достигает  $100 \text{ кг/см}^2$ . Так как это сцепление исчезает как только уничтожается натяжение воды погружением образца под воду, то, очевидно, оно обязано своим существованием свойствам воды в образце грунта.

Фишер, используя математическую схему идеальной почвы, вывел следующее уравнение для напряжения в группе шаров, приложимое ко всем случаям влажности:

$$F = \left( p + \frac{2T}{r} \right) (A - a). \quad (89)$$

Здесь  $F$  — статическое напряжение,  $p$  — отрицательное добавочное давление,  $T$  — поверхностное натяжение,  $r$  — радиус шара,  $A$  — проекция сухой площади внешнего слоя шаров на единицу площади поверхности,  $a$  — проекция соответствующих площадей части внутри группы.

Исходя из этой формулы, Фишер полагает, что с увеличением влажности напряжение в почве, а следовательно, и сцепление, обусловленное пленкой воды, прогрессивно падает во всем диапазоне фуникулярной и капиллярной влаги, т. е. в диапазоне влажности, где существует водяная пленка на почвенных частицах и действуют силы капиллярной природы. Значение  $p$  уменьшается с увеличением влажности в связи с уменьшением кривизны менисков;  $A$  не может возрастать с увеличением влажности, должно уменьшаться;  $a$  не может увеличиваться быстрее, чем  $A$ , поэтому  $(A - a)$  должно уменьшаться с увеличением влажности. В результате величина  $F$  должна уменьшаться с увеличением влажности, так как при этом уменьшаются оба члена уравнения. Формула содержит величину  $T/r$ , где  $r$  — диаметр шаров (слагающих частиц). Следовательно, напряжение возрастает с уменьшением размеров слагающих частиц, т. е. в тонкозернистых почвах оно больше. В грубозернистых материалах сцепление, обусловленное пленками воды, относительно мало. Поэтому для механических свойств крупных песков не важно, сухие они, влажные или мокрые.

Для тонкозернистых почв экспериментально найдены весьма высокие значения напряжения, но их нельзя всецело приписать наличию водяной пленки. Органические вещества тоже действуют как связывающий или цементирующий агент. Играть роль и физические силы, обусловленные наличием коллоидального вещества.

Опыты с раскалыванием почвенных блоков показали, что сила, необходимая для раскалывания, растет с уменьшением влажности блоков. Во влажных блоках при раскалывании клин производит ровный и гладкий разрез, что говорит о наличии пластической деформации, являющейся результатом сцепления, обусловленного наличием водных пленок. Сухой почвенный блок становится как бы хрупким и под действием клина внезапно раскалывается с образованием неправильной поверхности на отдельные куски, частицы которых связаны истинным сцеплением.

На кривых, изображающих связь между величинами сцепления и влажностью глинистых почв, Аттербергом обнаружены точки перегиба, которые обычно соответствуют переходу цвета почвы из темного в светлый, что наступает при проникновении воздуха в разрез почвы при его высыхании. Можно предположить, что кривые

сцепление—влажность на самом деле состоят из нескольких отдельных кривых.

Основной предпосылкой существования напряжения в грунте является трение между отдельными слагающими его зернами. Оно противоположно сдвигу. Сопротивление трения выражается уравнением

$$W = fP, \quad (90)$$

где  $W$  — сопротивление трения,  $P$  — давление, направленное перпендикулярно к плоскости трения,  $f$  — коэффициент трения.

Сопротивление трения для смазанных поверхностей равнозначно сопротивлению срезу смазывающей пленки, которая разъединяет поверхности.

Определения трения песка по стали показали, что коэффициент трения песка при крайних влажностях (0 и 20%) ниже, чем при

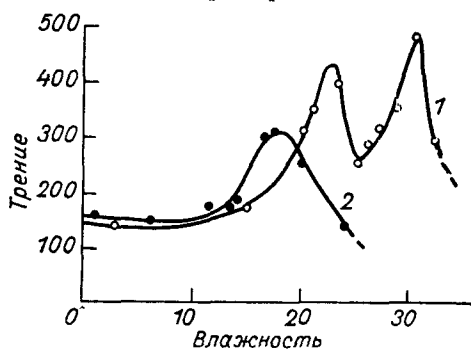


Рис. 30. Трение между металлической поверхностью скольжения и почвой различной влажности:

1 — глинистая почва, 2 — песчаная почва [91].

средних влажностях (5, 10 и 15%). Это позволяет предполагать, что в данном случае сопротивление трения обусловливается поверхностным натяжением капиллярной воды [219].

Для песчаных и супесчаных почв при содержании воды меньше 11—12% трение постоянно. В этом случае получается трение между металлом и фактически сухой почвой, так как влага вся удерживается у точек соприкосновения частиц почвы друг с другом, действующая же область со-

прикосновения металла с почвой, которая проходит по верхним краям верхнего слоя частиц, сухая или близка к этому. При влажности от 12 до 17% трение возрастает. При этом увлажнении в почве уже имеется достаточное количество влаги для соприкосновения почвы с поверхностью металла. При влажности 17% и выше водяная пленка практически непрерывна и оказывает смазывающее действие, в связи с чем трение падает до тех пор, пока почва не становится настолько жидкой, что теряет способность удерживать тяжесть орудий ([91], рис. 30, кривая 2).

Глинистая почва имеет такую же последовательность в изменении трения обычно в более широких пределах влажности. Но здесь имеется еще вторая причина возрастания трения: почва начинает прилипать к металлу. Решающее значение имеет уже не трение между почвой и металлом, а только трение между почвой, налипшей на орудие, и почвой обрабатываемой. Становится заметным эффект пластичности. С увеличением влажности пла-

стичность уменьшается, кривая быстро опускается вниз (рис. 30, кривая I).

Сопротивление почвы орудиям обработки обуславливается не только трением поверхностей в точках касания, но и статическим сопротивлением изменению расположения слагающих почву отдельных частей (частиц и агрегатов).

В песках сопротивление орудиям обработки в высокой мере обуславливается величиной сопротивления изменению расположения слагающих почву частиц. В суглинках и глинах вследствие гибкости чешуеобразных частиц это сопротивление отходит на задний план. На первое место выступает скольжение чешуеобразных частиц одна по другой. В песке вследствие высокого давления на точки касания может иметь место прорыв водяной пленки, при котором вода действует как антисмазка. В глине вследствие малого давления на точки касания пленка остается цельной, вода ослабляет связь между глинистыми частицами и действует как смазка.

По механическому действию на свойства почв и грунтов поверхностное натяжение капиллярной воды в природных условиях превосходит все остальные силы. Оно в состоянии оказывать давление до 200 атм.

Исходя из указанных выше представлений, Терцаги причинную связь между формой слагающих почву и грунт частиц и прочностью сцепления объясняет следующим образом.

В массе, состоящей из чешуек (глины), число частиц в единице объема во много, много раз больше, чем в единице объема массы, состоящей из полных зерен (песка) равного эквивалентного диаметра. Поэтому ширина путей воды в массе из чешуек составляет лишь ничтожную долю ширины путей в массе полных зерен. Листовидное наложение чешуевидных составных частиц глины обуславливает гораздо большую протяженность водяной пленки, заключенной между частицами глины, по сравнению с протяженностью пленки в песке. А чем больше эта протяженность, тем больше и сумма поверхностного натяжения капиллярной воды в каждом месте касания, т. е. тем больше прочность прилипания (сцепления). Агрегаты из чешуеобразных частиц под действием давления уплотняются гораздо сильнее, чем агрегаты выпуклых зерен. Вследствие этого в глинистых агрегатах капиллярное давление при высыхании вызывает более значительное сужение капиллярных пор, а следовательно, и более значительное увеличение отрицательного дополнительного капиллярного давления, чем в песчаных.

Выражение «тяжелая» и «легкая» почва, употребляемое практиками сельского хозяйства, отражает величину сопротивления различных почв орудиям обработки.

### **Консистенции почв и методы их определения**

В полевых условиях сцепление почвы практически нацело определяется капиллярным натяжением, которое функционально связано с влажностью почвы. При изменении влажности в соответст-



вии с изменением величины сцепления почва меняет свое физико-механическое состояние или, как принято говорить, меняет свою консистенцию.

Различают три основные формы консистенции: текучую, пластичную и твердую.

В текучей консистенции почва представляет собой кашеобразную массу, которая течет под влиянием собственного веса.

В пластичном состоянии почва может принимать любую придаваемую ей форму. В зависимости от требуемых усилий, пластичную консистенцию подразделяют на три вида: липкопластичную, мягкопластичную и твердопластичную.

В твердой консистенции куски глинистой почвы друг к другу не пристают (не слипаются) и при высыхании не сжимаются, а куски песчаной почвы рассыпаются на первичные отдельные. Поэтому твердую консистенцию применительно к пескам часто называют сыпучей.

При изменении влажности почва может перейти из одной консистенции в другую, ближайшую. Границы между соседними консистенциями называются пределами консистенций. Пределы консистенций почвы — это те узловые точки, в которых почва меняет физико-механическое состояние. Они выражаются в соответствующих величинах влажности почвы (в % абсолютно сухого веса). У одних и тех же пределов консистенции влажность различных почв весьма различна. Но в диапазоне влажности между верхним и нижним пределами каждой консистенции различные почвы находятся в одном и том же физико-механическом состоянии. Поэтому для оценки условий производства полевых работ пределы консистенций могут быть приняты в качестве агрогидрологических констант. Такой подход позволяет для каждой почвы выделить диапазоны влажности, равноценные в отношении условий работы почвообрабатывающих орудий и машин, и тем самым обеспечивает сравнимость влажности различных почв.

Мелкоземистые почвы могут быть любой консистенции, причем чем мелкоземистее почва, тем выше степень ее пластичности. Для песчаных почв в силу слабого сцепления почвенных частиц между собой пластичное состояние отпадает. При увеличении влажности они непосредственно переходят из твердого (сыпучего) состояния в текучее.

Для оценки степени пластичности различных почв Терцаги предложил число пластичности, равное разнице между пределом текучести и твердости (скатывания). По этому признаку он подразделил все почвы и грунты на четыре класса пластичности (табл. 58).

Методика определения пределов консистенции почв, принятая в системе Гидрометслужбы, проста и общедоступна. Она сводится к определению влажности образца почвы в момент перехода ее из одной консистенции в другую.

Техника определения такова. Образец почвы (лучше живой или воздушно-сухой) помещается в чашку с овальным дном и пологими краями (удобны фарфоровые чашки выпаривания). В него

подливается вода до тех пор, пока почва не станет жидкой тестообразной массой. В чашке почва хорошо размешивается, ножом или шпателем распределяется по дну и частично по внутренним стенкам чашки слоем толщиной около 1 см. После этого посредине чашки ножом или шпателем проводится V-образная бороздка (рис. 31). Чашку берут одной рукой за край, а ладонью другой руки несколько раз (пять—восемь) легко ударяют снизу по дну. Если бороздка при этом заплывает больше чем на половину высоты, то считают, что почва находится еще в текучем состоянии и чашку с образцом почвы оставляют подсыхать в обычных комнатных условиях (без искусственного подогрева).

Таблица 58

Классы пластичности почв, по Терцаги

Класс пластичности	Число пластичности	q
Первый . . . . .	$>15$	$>2$
Второй . . . . .	от 15 до 7	от 1 до 2
Третий . . . . .	от 7 до 1	$<1$
Четвертый . . . . .	$<1$	0

Примечание. q — количество песка, которое следует смешать с единицей веса глины в сухом состоянии, чтобы уничтожить ее пластичность.

После подсушивания пробу в чашке еще раз перемешивают, делают бороздку. Если бороздка при постукивании опять заплывает больше чем на половину, то продолжается подсушивание образца и производится повторное определение. Если бороздка при постукивании заплывает менее чем на половину, то из чашки берут пробу на влажность. Последняя и является нижним пределом текучести данной почвы.

Оставшуюся в чашке почву оставляют для дальнейшего подсыхания. Через 1—2 ч чистым шпателем, ножом или рукой пробуют, прилипает ли к ним почва (рис. 32). Пока почва загрязняет погруженный в нее чистый нож, шпатель или руку, она считается липкопластичной и подвергается дальнейшему подсушиванию, до тех пор пока она не перестанет налипать. В момент, когда будет впервые отмечено прекращение налипания, из чашки берется проба на влажность, величина последней является нижним пределом липкопластичного или верхним пределом мягкопластичного состояния.

После дальнейшего подсушивания (также в обыкновенных комнатных условиях) почву раскатывают руками в нити толщиной 3—4 мм. В момент, когда почва прекращает вытягиваться в нити и распадается на небольшие куски, но при сдавливании рукой все же еще образует сравнительно связный комок, рассыпающийся от легкого толчка, берут пробу на влажность. Эта влажность

является нижним пределом мягкопластичного или верхним пределом твердопластичного состояния почвы.

Нижним пределом твердопластичного, или верхним пределом твердого (сыпучего), состояния считается влажность почвы, при которой после дальнейшего подсыхания образца (иногда в течение нескольких дней) при сдавливании рукой комков глинистой или суглинистой почвы перестает менять свою форму и отдельные его части не слипаются друг с другом. Супесчаные же почвы при этой влажности не связываются совсем и рассыпаются.

Все определения пределов консистенции ведутся в четырехкратной повторности. Влажность почвы определяется методом сушки образцов до постоянного веса при температуре 105° С. При определениях следует строго соблюдать описанную выше последовательность операций, начиная с определения предела текучести, соответствующего наиболее влажной почве, и переходя к кон-



Рис. 31. Определение текуче-го состояния почвы.

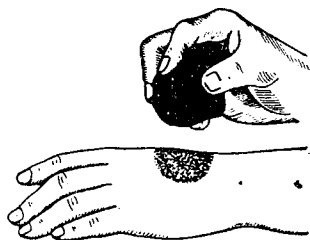


Рис. 32. Определение липкого состояния почвы.

систенциям, соответствующим более сухой почве, так как равномерное смачивание почвы при ее увлажнении возможно только при избытке влаги<sup>1</sup>.

На основе параллельных анализов более чем 500 образцов различных почв Европейской территории СССР в 1934—1937 гг. были установлены связи пределов консистенции с другими агрогидрологическими константами, позволяющими выделять в различных почвах количество равнозначной по натяжению влаги. Они таковы.

В избыточно увлажненной почве, пока все капилляры заполнены водой и капиллярное натяжение почвенной влаги остается близким к нулю, сцепление почвенных частиц друг с другом практически отсутствует. При такой высокой влажности почве присуще свойство текучести.

Нижний предел текучести (влажность, при которой почва теряет свойство текучести) связан с максимальной капиллярной влагоемкостью уравнением регрессии

$$u=0,81U_k+11,7, \quad (91)$$

<sup>1</sup> Желательно с самого начала операций по определению пределов консистенции иметь параллельные запасные пробы, подсушиваемые так же как и основная, поскольку количество почвы одной пробы часто бывает недостаточным для определения всех пределов консистенции.

где  $u$  — нижний предел текучести (в % абсолютно сухой почвы),  $U_r$  — максимальная капиллярная влагоемкость (в % абсолютно сухой почвы).

Как только почва начинает подсыхать, возникает капиллярное натяжение и начинают проявляться силы сцепления почвенных частиц друг с другом. Почва теряет текучесть и приобретает пластичность: легко принимает любую придаваемую ей форму. Однако силы сцепления почвенных частиц друг с другом еще невелики, они меньше сил сцепления почвенной влаги с металлическими частями почвообрабатывающих машин и орудий. Поэтому почва легко на них налипает. Такое физико-механическое состояние почвы называется липкопластичным. Нижний предел липкопластичной консистенции почвы совпадает с наименьшей влагоемкостью почвы, что соответствует диапазону капиллярного натяжения 0,0—0,5 атм.

При дальнейшем подсыхании почвы, с возникновением в капиллярных порах свободных от воды просветов и дальнейшим уменьшением капиллярного натяжения, сцепление почвенных частиц друг с другом возрастает. Оно становится больше сцепления почвенной влаги с металлом. Влага сплошной пленкой окутывает почвенные частицы, почва уже не прилипает к металлу. Благодаря упругости водяных пленок почва сравнительно легко (в руках) раскатывается в тонкие нити. Такая ее консистенция называется мягкопластичной. В мягкопластичном состоянии почва легко режется и крошится. При соприкосновении с металлом почвенная влага играет роль смазки. В сельскохозяйственной практике мягкопластичное состояние принято называть спелостью почвы.

Нижний предел мягкопластичного состояния почвы связан с ее максимальной гигроскопичностью уравнением регрессии

$$u = 1,28U_r + 9,9. \quad (92)$$

В этом уравнении  $u$  — нижний предел мягкопластичного состояния (в % абсолютно сухой почвы),  $U_r$  — максимальная гигроскопичность почвы (в % абсолютно сухой почвы). Капиллярное натяжение почвенной влаги у нижнего предела мягкопластичного состояния почвы составляет около —8, —9 атм.

При дальнейшем высыхании почвы, когда вода остается лишь в самых тонких капиллярах и в стыках почвенных частиц, благодаря большой вогнутости менисков сцепление почвенных частиц друг с другом сильно возрастает. При такой влажности почва сохраняет еще некоторую пластичность, но уже не раскатывается в тонкие нити, а распадается на отдельные, которые при сдавливании рукой все же слипаются в комки. Такое состояние почвы называется твердопластичным. При соприкосновении твердопластичной почвы с металлом пленка воды еще выступает в роли смазки, но действие ее ограничено в связи с потерей сплошности.

Нижний предел твердопластичного состояния (влажность, при которой почва теряет пластичность) связан с максимальной гигроскопичностью почвы уравнением регрессии

$$u = 0,72U_r + 2,1, \quad (93)$$

где  $u$  — нижний предел твердопластичного состояния (в % абсолютно сухой почвы),  $U_r$  — максимальная гигроскопичность (в % абсолютно сухой почвы). Нижний предел твердопластичного состояния почвы практически соответствует ее максимальной гигроскопичности, капиллярное натяжение почвенной влаги приближается к —50 атм.

Когда в почве остается адсорбированная (гигроскопическая) влага и лишь частично влага в стыках почвенных частиц (манжеты), почва переходит в твердое или сыпучее состояние. Сцепление частиц глинистых почв при таком увлажнении достигает огромных значений, 50 атм и больше. Песчаные же почвы вследствие ничтожных количеств в них воды этих категорий совершенно теряют связность, становятся сыпучими. При соприкосновении металла с лишенными водных оболочек почвенными частицами возникает большое трение.

В соответствии с изложенными выше зависимостями для наиболее распространенных суглинистых почв твердое состояние соответствует запасам продуктивной влаги в пахотном слое 0—20 см, близким к нулю, твердопластичное — запасам 0—20 мм, мягкопластичное — запасам 20—50 мм, липкопластичное и текучее — запасам, большим 50 мм.

На основе вышеприведенных связей физико-механических свойств почвы с ее влажностью была разработана методика полевых визуальных наблюдений над влажностью почвы пахотного слоя. По своей простоте эта методика позволяет проводить наблюдения в учтенные сроки (ежедневно) во многих точках, а также в то время, когда поле еще недоступно для бурения: весной, до установления водного равновесия в почве, и осенью, в период перемежающегося подмерзания и оттаивания почвы. Эта методика сводится к определению состояния (консистенции) почвы непосредственно в поле в момент наблюдения [148].

При визуальных наблюдениях влажность почвы оценивается по пяти градациям, указанным в табл. 59. Мерзлое состояние почвы отмечается буквой «м» с соответствующим степеню ее промерзания значком (0, 1, 2 или 3, глава V).

Таблица 59

Градации увлажнения почвы, принятые  
при визуальных наблюдениях

Степень увлажнения почвы	Физико-механическое состояние почвы (консистенция)
Избыточно увлажненная	Текучее
Сильно увлажненная	Липкопластичное
Хорошо увлажненная	Мягкопластичное
Слабо увлажненная	Твердопластичное
Сухая	Твердое или сыпучее

Подобно инструментальным визуальные наблюдения над влажностью производятся на наблюдательных участках не менее чем

в четырехкратной повторности. В каждом месте определения берутся две пробы почвы: одна с поверхностного слоя почвы (0—2 см), а другая с глубины 10—12 см. Для каждой пробы в отдельности тут же в поле сразу после выемки определяется состояние почвы (консистенция).

### Роль физико-механического состояния почвы в производстве полевых работ

Разработка описанной выше методики определения физико-механического состояния почвы обеспечила возможность экспериментальных полевых исследований влияния влажности почвы на работу и производительность почвообрабатывающих машин и орудий. Эти исследования были проведены совместно с Северо-Западной областной станцией механизации, возглавляемой К. И. Васильевым, в условиях нечерноземных (Ленинградская и Новгородская области) и черноземных (Зерноград Ростовской области) почв.

Результаты этих работ показали следующее.

1. Потери скорости на буксование колесного трактора на тяжелых дерново-подзолистых почвах уменьшаются по мере подсыхания почвы и перехода ее от текучего состояния к пластичному (табл. 60).

Таблица 60

Буксование колесного трактора при вспашке при различной консистенции почв (нечерноземная зона)

Почва	Поле	Горизонт почвы	Консистенция почвы	Процент буксования
Глинистая	После уборки картофеля	Пахотный	Текучая	30
	То же	Подпахотный	Липкопластичная	
Тяжелосуглинистая	„	Пахотный	„	30
		Подпахотный	„	20
	Стерня зерновых	Пахотный	Мягкопластичная	7
		Подпахотный	„	
Среднесуглинистая	То же	Пахотный	Липкопластичная	20
		Подпахотный	„	
	„	Пахотный	„	14
		Подпахотный	Мягкопластичная	
Легкосуглинистая	После уборки картофеля	Пахотный	Текучая	Трактор вязнет местами
		Подпахотный	„	
	Клевещище	Пахотный	„	
		Подпахотный	„	
	Стерня зерновых	Пахотный	„	17
		Подпахотный	Липкопластичная	
Супесь	Клевещище	Пахотный	„	10
		Подпахотный	„	
	„	Пахотный	Текучая	9
		Подпахотный	Липкопластичная	

2. При текущем состоянии пахотного и подпахотного горизонтов вспашка колесным трактором почти невозможна.

3. Если почва подпахотного слоя липкопластичная, то эффективность работы трактора одинакова как при текущем, так и при липкопластичном состоянии пахотного горизонта; она меняется лишь в зависимости от характера угодий.

4. Большие потери скорости на буксование при обработке почв в липкопластичном состоянии обусловлены перегруженностью трактора, которая вызывается налипанием почвы на рабочие части плуга.

5. В случае залипания плуга вспашка производится на неполную глубину.

6. Вследствие искажения формы отвалов плуга при налипании почвы качество пахоты бывает низким: почва сгруживается, не образует перевернутого пласта и не крошится.

7. Обработка почвы в мягкопластичном состоянии, благодаря хорошей сцепной мощности и небольшой нагрузки на трактор, обеспечивает максимальную его производительность. Даже на тяжелосуглинистых почвах на мягкой пахоте буксование составляет всего 7%. Обработка почвы производится высококачественно: почва не прилипает к металлу, легко режется и крошится, оборот пласта получается полный, борозда правильной и чистой.

На работу гусеничного трактора даже при максимальной нагрузке (сцеп с канавокопателем) влажность почвы заметного влияния не оказывает (табл. 61). В большинстве случаев потери скорости на буксование не выходят за допустимые пределы (3—5%). Исключение составляют редкие случаи крайнего переувлажнения, притом лишь для почв, характеризующихся большой рыхлостью пахотного горизонта (после пропашных культур), когда коэффициент буксования достигает 60%, действительная скорость падает почти вдвое и трактор иногда останавливается.

В случае низкой влажности, обуславливающей твердое или близкое к нему состояние почвы, при работе с канавокопателем пахотный слой поднимается крупными глыбами, пласт не вырезается ножами, а отламывается, давая рваные откосы; борты и дно канавы засыпаются грунтом, приобретая вид бесформенной борозды. Затраты тяговых усилий огромны.

Результаты исследований на черноземных почвах (тяжелосуглинистые приазовские черноземы) показывают, что влияние влажности почвы на работу гусеничного трактора с прицепом трех плугов в десять корпусов и бороны зигзаг в пять звеньев при вспашке стерни пшеницы уже заметно сказывается. При мягкопластичном состоянии пахотного и подпахотного горизонтов действительная скорость вспашки составляет 1,21 м/с, при липком же состоянии 1,09 м/с.

Влияние увлажнения почвы на производство полевых работ наиболее ярко сказывается на мягкой пахоте, особенно после пропашных культур. Наличие дернины и неразложившихся корней в заметной степени ослабляет это влияние, так как в переувлаж-

Буксование гусеничного трактора ЧТЗ при сцене с канавокопателям в зависимости от консистенции почв (нечерноземная зона)

Почва	Уголье	Горизонт почвы	Консистенция почвы	Процент буксования	Действительная скорость (м/с)
Торфяная	Луг со слабо развитой дерниной	A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	Текучая	Трактор останавливается	0,55
	Луг с хорошо развитой дерниной	A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	"		
	Поле после уборки клуб- некорнеплодов	Пахотный Подпахотный	Мягкопластичная		
	Поле после уборки клуб- некорнеплодов	Пахотный Подпахотный	Текучая Липкопластичная		
Среднесуглинистая	Суходольный луг	A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	Текучая Липкопластичная	0,75	0,40
	Стерня зерновых	Пахотный Подпахотный	Твердая		
	Клеверные	Пахотный	"		
		Подпахотный	"		
Легкосуглинистая	Клеверные	Пахотный	"	2,6	0,64
		Подпахотный	"		



ненной почве дернина создает дополнительную опору, а в сухой почве корневые остатки лучше обеспечивают рыхление почвы вследствие разрыва ее по корням.

Обработка легких почв (супесей, легких суглинков) возможна в более широких пределах увлажнения, чем тяжелых суглинистых и глинистых, так как липкость легких почв ничтожна.

Особенно осторожным должен быть выбор сроков обработки засоленных почв. Эти почвы вследствие малой мощности верхнего гумусового слоя, плохой структуры и малой водопроницаемости подстилающих горизонтов резко меняют свои физико-механические свойства. Они сильно залипают при малейшем избытке влаги, сильно затвердевают и растрескиваются при незначительном ее уменьшении. Обработку засоленных почв следует производить только при переходе их в мягкопластичное состояние.

Возможность обработки почвы в позднесенний и ранневесенний периоды определяется временем подмерзания и оттаивания самых поверхностных ее слоев. Вызывается это тем, что при охлаждении почвы до  $-0^{\circ}\text{C}$  и ниже часть почвенной влаги переходит в лед. В связи с кристаллизацией количество жидкой воды в почве уменьшается, силы сцепления частиц почвы друг с другом увеличиваются, почва приобретает свойства твердого монолитного тела.

Чем влажнее почва и чем ниже ее температура, тем сильнее цементируется почва и тем труднее поддается обработке.

В силу сказанного обработка почвы может производиться только в талом состоянии: весеннее боронование — при оттаивании на глубину, не меньшую 10 см, пахота — на глубину, не меньшую 30—50 см. Длительность периода оттаивания почвы на указанные глубины в зависимости от типа мерзлотного процесса, увлажнения почвы, степени ее выхолаживания, особенностей весны по территории СССР существенно различается. В южных районах с сильным прогреванием почвы летом и неглубоким ее промерзанием зимой (10—15 см) она может полностью оттаивать снизу под воздействием поступающего из глубоких слоев тепла еще до схода снежного покрова.

На всей территории с устойчивой зимой, где промерзание почвы, за исключением редких лет, превышает 15 см, оттаивание пахотного слоя обычно начинается сверху, только после освобождения почвы от снега.

Глубина оттаивания почвы в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод может быть рассчитана по формуле (51), в районах с неустойчивой зимой и глубоким стоянием почвенно-грунтовых вод — по формуле (54), в районах ненасыщенных почв и глубоким стоянием почвенно-грунтовых вод (Юго-Восток Европейской территории СССР) — по формуле (52).

Для засушливых районов Юго-Востока, где снежный покров невысок и к весне на полях имеются не покрытые снегом участки, вследствие чего оттаивание верхних слоев почвы происходит особенно быстро, целесообразно для вычисления длительности оттаивания

вания верхних слоев почвы вместо уравнения (52) использовать уравнение

$$n = \frac{h}{0,346t + 1,72}, \quad (94)$$

где  $n$  — число дней со времени схода снежного покрова до оттаивания почвы на заданную глубину,  $h$  — заданная глубина оттаивания верхнего слоя почвы (см),  $t$  — среднесуточная температура воздуха.

Рассчитанная по указанным формулам длительность периода оттаивания почвы на глубины 10 и 30 см существенно различается по территории СССР, особенно в холодные вёсны. Так, при среднесуточной температуре воздуха в этот период около  $1^\circ\text{C}$  для оттаивания почвы на глубину 10 см требуется в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод (на Северо-Западе Европейской территории СССР) 10 дней, на Юго-Востоке — всего 5 дней; для оттаивания почвы на глубину 30 см — соответственно 31 и 14 дней (табл. 62).

Таблица 62

**Длительность периода (в днях) от схода снежного покрова до оттаивания верхних слоев почвы**

Глубина оттаивания почвы (см)	Среднесуточная температура воздуха ( $^\circ\text{C}$ )							
	0	1	2	3	4	5	6	7

Районы сильного увлажнения с высоким стоянием почвенно-грунтовых вод

10	29	10	6	5	4	3	—	—
30	—	31	19	14	11	7	6	5

Районы с неустойчивой зимой и глубоким стоянием почвенно-грунтовых вод

10	9	7	5	3	3	2	—	—
30	—	20	13	10	8	6	6	5

Районы ненасыщенных почв с глубоким стоянием почвенно-грунтовых вод

10	6	5	4	4	3	3	—	—
30	—	22	11	7	6	4	4	3

Поскольку районам сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод в силу их климатических особенностей свойственны затяжные и холосные вёсны, а районам ненасыщенных почв и глубокого стояния почвенно-грунтовых вод — вёсны с крутым подъемом температур, то различия между районами в разрыве времени установления положительных температур и оттаивания верхних слоев почвы обычно еще намного больше, чем указано выше.

Начало весенних полевых работ может существенно задерживаться и после оттаивания почвы вследствие ее избыточного увлажнения.

Как уже ранее говорилось (глава VII), пока просачивающиеся талые воды опираются на водонепроницаемый мерзлый слой, зеркало капиллярной, а иногда и свободной воды выходит на поверхность. В районах сильного увлажнения и неглубокого залегания грунтовых вод и верховодок такое переувлажненное состояние, а следовательно, и задержка полевых работ сохраняется до полного оттаивания почвы — исчезновения мерзлой подошвы, когда по закону тяжести избыток воды сбрасывается в грунтовые воды. Районы, где нижние слои почвы недоувлажнены и где по мере оттаивания избыток талых вод расходуется на их увлажнение, начало полевых работ возможно и в тех случаях, когда в глубоких слоях почвы имеется еще мерзлота. В результате в этих районах, несмотря на значительно большую глубину промерзания, длительность периода от начала положительных температур до начала полевых работ в среднем на 10—15 дней меньше, чем в районах сильного увлажнения, а процент лет с малой длительностью этого периода значительно больше.

Так, средняя длительность периода от установления положительных температур до начала полевых работ в Безенчуке составляет 16 дней, в Белогорке — 27 дней, причем в Безенчуке повторяемость весен с разрывом меньше 10 дней составляет 30%. В Белогорке таких весен нет, наоборот, там в 30% лет этот разрыв бывает больше 30 дней, а в отдельные годы превышает 40 дней. В Безенчуке же длительность этого периода больше 30 дней никогда не бывает.

Обобщение опубликованных к настоящему времени в агроклиматических справочниках материалов многолетних наблюдений сети станций Гидрометслужбы за физико-механическим состоянием почвы позволило дать характеристику сроков начала и конца полевых работ на всей территории СССР. Эти данные представлены в виде карт (рис. 33 и 34).

За начало обработки почвы была принята среднеемноголетняя дата перехода почвы в мягкопластичное состояние весной, за конец — переход почвы в липкое или текучее состояние осенью или же начало устойчивого промерзания почвы.

Из рис. 33 следует, что самое раннее созревание почвы и самое раннее начало весенних полевых работ присуще югу Украины и Северного Кавказа. По среднеемноголетним данным, весенние полевые работы здесь начинаются уже в марте. К 10 IV их фронт продвигается до линии Гродно—Харьков—Волгоград; к 20 IV — до линии Калининград—Минск—Белгород—Саратов—Куйбышев—Актюбинск.

В 3-ю декаду апреля весенняя обработка почвы разворачивается на огромной территории. В нее включается уже Азиатская территория СССР — весь Северный Казахстан, большинство районов Западной Сибири, а на Европейской территории Союза — весь центр

и большинство Прибалтийских республик. На 1 V граница полевых работ проходит по линии Таллин—Смоленск—Ярославль—Казань—Уфа—Челябинск—Тюмень—Омск—Новосибирск—Кемерово—Благовещенск. Севернее 60° с. ш. как на Европейской, так и на Азиатской территории СССР весенние полевые работы развертываются лишь во второй декаде мая.

Таким образом, в отношении темпов развертывания полевых работ по территории между Европейской и Азиатской территорией СССР существует большое различие. На Европейской территории СССР продвижение полевых работ с юга на север очень растянуто, достигает 7 декад. На Азиатской территории СССР благодаря континентальности климата продвижение фронта весенних полевых работ по территории сужено, составляет всего 3 декады.

На основе совокупности инструментальных и визуальных наблюдений над влажностью почвы сети гидрометеостанций дана характеристика условий обработки почвы в течение всей теплой части года в степной, лесостепной и подтаежной зонах Азиатской территории СССР и в лесостепной и степной зонах Заволжья [35, 36].

В степной и южной лесостепной части Западной Сибири в обычные по метеорологическим условиям годы производство полевых работ в летнее время затрудняется сухостью почвы, обуславливающей большие тяговые усилия. Число дней с благоприятными условиями производства работ (мягкопластичное состояние почвы) за год составляет: в Кулундинской степи—лишь 40—45, в Предальтайской степи—90—95 и в южной лесостепи—75—80 дней. Наиболее благоприятным месяцем является май, когда мягкопластичное состояние в отдельных частях территории соответственно наблюдается в течение 25—30 дней. На севере лесостепи до середины мая возможны затруднения в пахоте вследствие избыточного увлажнения почвы: текучего и липкопластичного ее состояния.

В подтаежной зоне с ее увалами, гривами, заболоченными межгрядными пространствами и пестрыми почвами избыточное увлажнение в летний период играет уже значительно большую роль. В мае, июне и даже в июле число дней с липкопластичным и текучим состоянием почвы здесь достигает 7—10 за месяц.

На Европейской территории СССР, на преобладающей части восточных и юго-восточных районов лесостепной, степной и сухостепной зон Заволжья, качественное проведение полевых работ в основном затрудняется сухостью почвы. Лишь в северных и восточных районах лесостепной зоны производство работ в начале и конце периода несколько ограничивается избытком влаги в почве.

Особенно тяжелые условия наблюдаются в сухостепной зоне. Здесь качественная обработка почвы практически невозможна в течение почти всего периода полевых работ. Уже в мае число благоприятных для обработки дней (мягкопластичное состояние) не превышает 5. В июне, июле, августе почва все время находится в твердом состоянии. Существенного улучшения условий обработки почвы здесь не происходит до самого конца теплого периода.

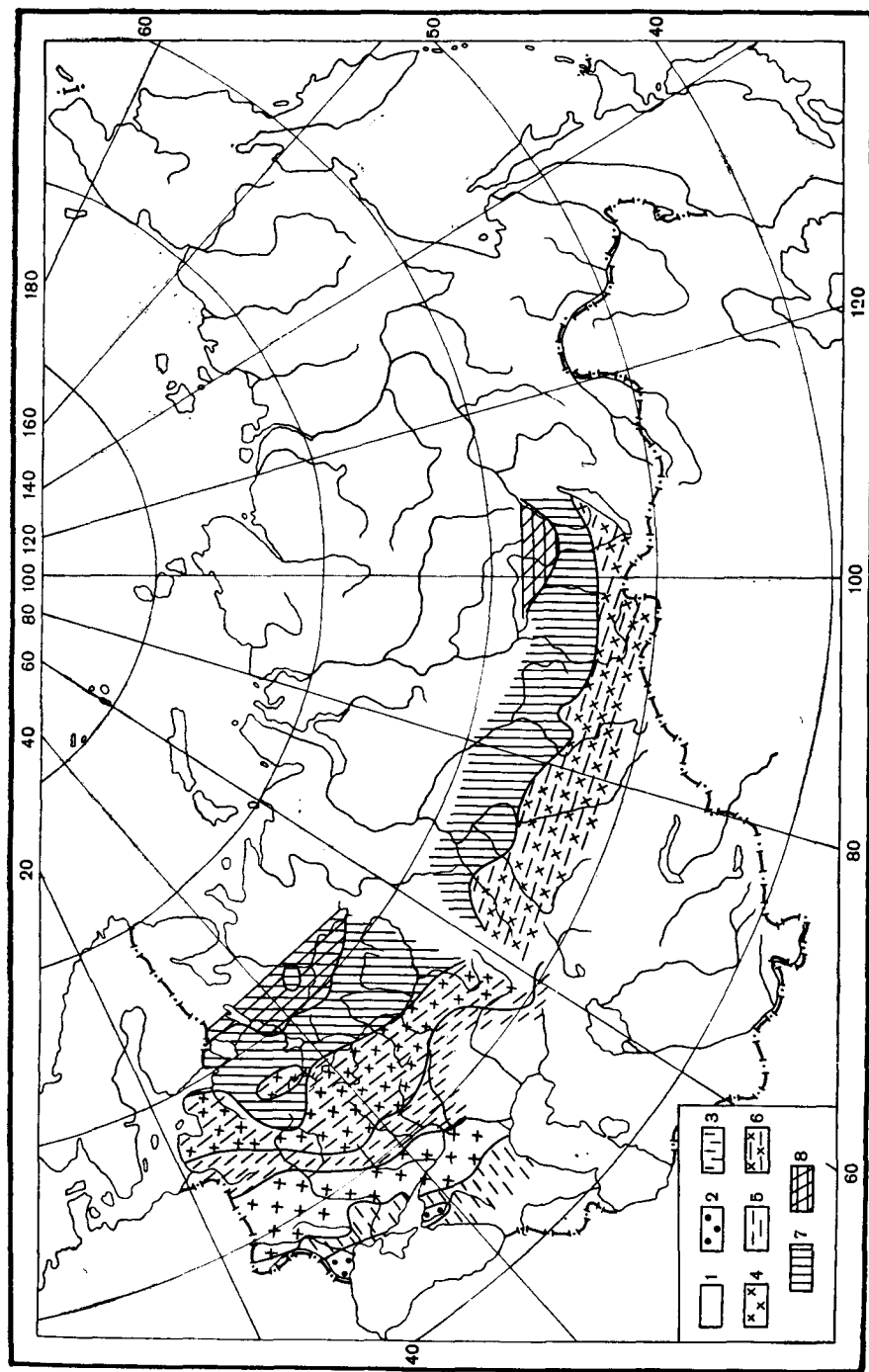


Рис. 33. Среднемноголетние даты начала весенних полевых работ (переход почвы в мягкопластичное состояние).

1 — районы горные, поливные и слабо изученные в отношении состояния почвы, 2 — районы 20 III, 3 — 21–31 III, 4 — 1–10 IV, 5 — 11–20 IV, 6 — 21–30 IV, 7 — 1–10 V, 8 — позднее 10 V.

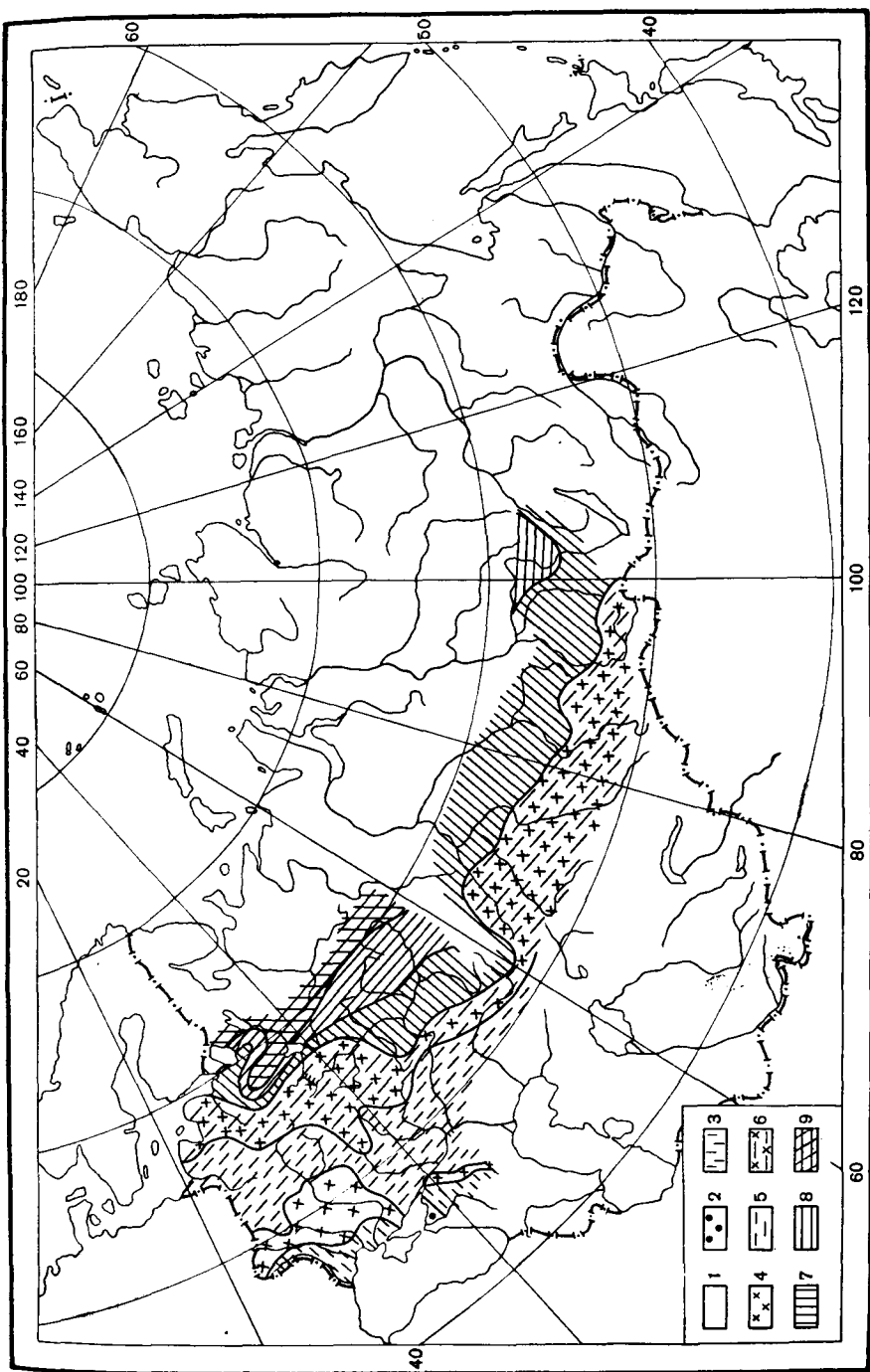


Рис. 34. Среднегодовые даты окончания полевых работ (почва избыточно увлажненная, мерзлая или покрытая снегом).  
 1 — районы горные, поливные и слабо изученные в отношении состояния почвы, 2 — позднее 20 XI, 3 — 11–20 XI, 4 — 1–10 XI, 5 — 21–31 X, 6 — 11–20 X, 7 — 1–10 X, 8 — 21–30 IX, 9 — раньше 20 IX.

По данным многолетних наблюдений сети гидрометеостанций, прекращение обработки почвы осенью раньше всего происходит в северных районах Европейской территории СССР. Здесь, главным образом из-за переувлажнения почвы, уже в 3-й декаде сентября обработка бывает сильно затруднена, а в большинстве дней декады и совсем невозможна (рис. 34).

На 10 X, по среднемноголетним, граница прекращения полевых работ проходит по линии Ленинград—Белозерск—Новгород—Старая Русса—Вологда—Сыктывкар—Пермь.

К 20 X полевые работы прекращаются уже в большинстве северо-западных районов Европейской территории СССР, в Верхнем и Среднем Поволжье, в Предуралье, а также на территории Западной Сибири, кроме наиболее южных степных ее районов.

К I/XI работы прекращаются на всей территории, лежащей к северу от границы Клайпеда—Могилев—Орел—Белгород—Липецк—Уральск—Целиноград, а к 10 XI — на территории севернее линии Львов—Проскуров—Житомир—Чернигов—Днепропетровск—Ростов-на-Дону—Сальск Степной—Элиста. В южных же районах Молдавской, Украинской ССР и на преобладающей части территории Северного Кавказа среднемноголетние даты прекращения полевых работ отмечаются лишь в 3-й декаде ноября, а местами даже несколько позже.

Таким образом, и в отношении дат прекращения полевых работ Европейская территория СССР сильно отличается от Азиатской (рис. 34). На Европейской территории разница в сроках прекращения работ между крайними северными и южными районами превышает 2 месяца (3-я декада сентября—3-я декада ноября), на Азиатской она составляет всего лишь 1 месяц (1—3-я декады октября).

Особенно же большие различия имеются в длительности периода производства полевых работ (т. е. периода от начала полевых работ весной до прекращения их осенью). В самых северных районах Европейской территории СССР период производства полевых работ исчисляется лишь в 4,5 месяца, а самых южных — 9 месяцев. На Азиатской территории СССР соответственно величины составляют 5 и 6,5 месяца.

## Глава X

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРОТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ И ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Для получения высоких урожаев необходимо обеспечить жизненную потребность культурных растений в воде, поэтому одной из основных задач земледелия издавна является создание водного режима почв, соответствующего потребности культур.

Запасы влаги регулируются как агротехническими, так и мелиоративными приемами.

Агротехнические приемы, направленные на улучшение водоснабжения посевов, сводятся к стремлению наилучшим образом использовать выпадающие осадки путем регулирования расхода влаги, подбора культур соответственно их требованиям к водному режиму и соответствующей организации хозяйств.

К мелиорации обычно прибегают в крайних случаях, когда агротехнические приемы бессильны или недоступны. В районах избыточного увлажнения путем осушки регулируются уровни залегания грунтовых вод и верховодок, в сухих — увеличивается приход влаги путем поливов (орошение). Как в том, так и в другом случае запасы влаги могут быть отрегулированы в широких пределах в соответствии с требующимся режимом влажности почвы.

В случае осушения слой капиллярного насыщения может быть по мере надобности снижен или даже полностью выведен из почвенной толщи, а тем самым влажность почвы может быть уменьшена ниже капиллярной ее влагоемкости. В случае орошения влажность почвы в любой момент может быть увеличена до наименьшей влагоемкости.

В накоплении, сохранении и правильном использовании влаги большая роль принадлежит системе обработки почвы. Эта роль особенно велика в засушливых районах, так как здесь приходится иметь дело с ограниченными ресурсами влаги. Накопленные к настоящему времени материалы научных исследований и большой производственный опыт позволяют дифференцированно подойти к системе обработки почвы в различных почвенно-климатических зонах и привести систему и отдельные приемы агротехники в соответствие с условиями погоды каждого года.

Поскольку агротехнические приемы регулирования водного режима почв одновременно действуют и на другие элементы сельскохозяйственного производства, выбор системы и отдельных приемов агротехники в каждом конкретном случае определяется не только



их воздействием на водный режим почв, но и на весь комплекс условий, в которых протекает сельскохозяйственный процесс.

На режим влажности почвы и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур особо большое влияние оказывают пары и система обработки земли.

### Агрогидрологическая роль паров

Агрогидрологическая роль паров в основном сводится к исключению расходов влаги из почвы на транспирацию в течение целого вегетационного периода (чистые пары) или части этого периода (занятые пары), а также к повышению аккумуляции почвой осадков. Рыхлое, крупнокомковатое строение верхнего слоя почвы на паровом поле способствует хорошему проникновению воды в почву при выпадении дождей и сохранению ее в почве в сухую погоду вследствие замедленного подъема воды из нижних слоев к испаряющей поверхности. Это хорошо иллюстрируется данными табл. 63, где представлена динамика влажности почвы на паровом поле Шортандинской опытной станции (Целиноградская область) в засуху 1955 г. В этом году сумма осадков за период парования полей (июнь—август) на целине составила всего лишь 35 мм. Несмотря на это, запасы влаги в нижнем слое почвы парового поля 50—100 см практически все время держались на одном уровне и не реагировали на засуху, в то время как верхний пахотный горизонт сильно отзывался на условия погоды, быстро иссушаясь в бездожде и резко повышая запасы влаги после выпадения дождей. Метровый слой почвы в целом за период этой жесточайшей засухи потерял всего лишь 12 мм воды [177].

Таблица 63

**Запасы продуктивной влаги на чистом пару (мм) в 1955 г. Ст. Шортанды  
Целиноградской области**

Слой почвы (см)	Дата определения влажности почвы							Расход влаги из почвы за период 9 VI—15 VIII
	9 VI	18 VI	29 VI	9 VII	21 VII	29 VII	15 VIII	
0—20 . . . . .	13	10	10	5	23	9	8	5
20—50 . . . . .	33	35	35	29	33	35	26	7
50—100 . . . . .	31	34	32	32	30	35	31	0
0—100 . . . . .	77	79	77	66	86	79	65	12
Осадки, выпавшие между сроками определения влажности почвы (мм) . . . . .	0	0	0	0,3	28,8	4,1	1,6	34,8

По вопросу влияния паров на водный режим почв и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур проведены большие

многолетние исследования опытными сельскохозяйственными станциями и другими научно-исследовательскими учреждениями в различных почвенно-климатических зонах. Основная часть этих исследований относится к районам сухого земледелия.

Сетью опытных сельскохозяйственных станций изучение различного рода паров в России началось еще в конце XIX — начале XX столетия. В те годы познания о состоянии и свойствах почвенной влаги, в том числе и об агрогидрологических константах, были весьма ограничены. Поэтому опубликованные результаты исследований этого времени представлены в виде процентов веса абсолютно сухой почвы, а в наиболее ранних работах даже в процентах сырой почвы. Это сильно ограничивает их сопоставимость по территории и создает существенные трудности при обобщении. Проведенное за последние годы подразделениями Гидрометслужбы изучение агрогидрологических свойств почв этих опытных станций позволило в данной работе результаты их исследований (в том числе и за прежние, весьма отдаленные годы) представить в виде принятых в настоящее время единиц измерений — в миллиметрах продуктивной влаги.

Обобщение переработанных указанным выше способом материалов показывает, что черный, ранний и средний (вспашка не позже мая) пары почти нацело погашают создающийся в районах сухого земледелия ко времени уборки сельскохозяйственных культур дефицит запасов влаги в почве и обеспечивают благоприятные условия водоснабжения высеваемых по этим парам озимых культур. Так, восьмилетними исследованиями одной из старейших опытных станций нашей страны — Безенчукской [59, 231] — выявлено, что в засушливых районах Заволжья запасы влаги в метровом слое почвы на черном, раннем и среднем парах ко времени сева озимых культур на 100—110 мм больше, чем по беспарью, и на 45—55 мм больше, чем на позднем и занятом вико-овсяной смесью парах. В верхнем пахотном горизонте разница в пользу черного и чистого паров соответственно составляет около 20 и 10 мм. Поздний и занятый пары также дают существенные преимущества перед беспарьем. В метровом слое почвы этих паров запасы влаги примерно на 60 мм больше, чем по беспарью, а в пахотном — на 10 мм.

Судя по представленным в табл. 64 среднемноголетним запасам продуктивной влаги, можно считать, что в районе Безенчукской опытной станции черные и ранние пары в большинстве лет обеспечивают не только удовлетворительную, но и хорошую влагообеспеченность озимых: к моменту их сева средние запасы влаги в пахотном горизонте составляют 33 мм. Поздние и занятые пары обеспечивают удовлетворительную влагообеспеченность (запасы 22 мм). Посев же озимых по беспарью в большинстве лет не обеспечивает даже появления своевременных всходов: средние запасы влаги в верхнем двадцатисантиметровом слое составляют здесь всего 12 мм.

Таблица 64

Запасы продуктивной влаги (мм) в почве на различных парах  
и беспарье перед посевом озимых, средние за 8 лет.  
Ст. Безенчук

Вид пара	Слой почвы (см)	
	0—20	0—100
Черный (вспашка осенью) . . . . .	33	149
Ранний (лущение осенью, вспашка в ап- реле) . . . . .	30	146
(вспашка в апреле) . . . . .	33	145
Средний (вспашка в мае) . . . . .	32	141
Поздний (вспашка в июле) . . . . .	22	95
Занятый ( вико-овсяной смесью) . . . . .	22	96
Беспарье . . . . .	12	37

Изучение Безенчукской станцией засеянных различными культурами занятых паров (табл. 65) показало, что ко времени посева озимых все занятые пары сильно иссушают пахотный слой почвы — запасы влаги в нем колеблются около 15 мм, т. е. не обеспечивают появления нормальных всходов. Глубокие же слои почвы (до 1 м) ко времени сева озимых оказались наиболее сильно иссушенными на пару, занятом чечевицей, выращиваемой на зерно (запасы 75 мм), а наименее иссушенными — на пару, занятом кукурузой на зеленый корм (запасы 134 мм).

Таблица 65

Средние за 1929—1930 гг. запасы продуктивной влаги (мм) в почве  
на различных парах. Ст. Безенчук

Вид пара	Слой почвы 0—20 см			Слой почвы 0—100 см		
	весной	при вспашке вико-овсяного пара (после уборки смеси)	при севе озимой ржи	весной	при вспашке вико-овсяного пара (после уборки смеси)	при севе озимой ржи
Чистый						
ранний (апрельский)	38	32	28	158	104	159
поздний (июльский)	50	11	21	159	82	102
Занятый						
вико-овсяной смесью	34	13	16	152	75	100
кукурузой на зеле- ный корм . . . . .	38	11	16	156	118	134
чечевицей на зерно	40	19	15	182	98	75
картофелем . . . . .	45	14	16	142	108	99

Опыты, проведенные Безенчукской станцией по изучению роли кулисных паров в пополнении запасов влаги, показали, что эти пары характеризуются крайне неравномерным увлажнением почвы ко времени посева на них озимых культур. Вследствие больших

расходов влаги на транспирацию кулисных растений за период их вегетации запасы влаги в тех частях поля, где произрастали кулисные растения, намного ниже, чем в межкулисных пространствах. В верхнем пахотном слое почвы разность составляет 10 мм, в более глубоком (75 см) — 57 мм (различия примерно такие же, как и во влажности занятых и чистых паров). Это существенно отражается на водоснабжении озимых посевов в период осенней их вегетации и создает пестроту в их состоянии.

Исследования Краснокутской сельскохозяйственной опытной станции, расположенной в еще более засушливом, чем Безенчук, районе Заволжья (левобережье Саратовской области), показали, что здесь из-за недостатка влаги не только беспарье, но и поздние пары обычно не обеспечивают своевременного появления всходов озимых: запасы влаги в пахотном слое почвы ко времени сева озимых соответственно составляют всего лишь 5 и 7 мм. Ко времени сева лучшие, но также далекие от желаемых условия увлажнения почвы наблюдаются на ранних парах — запасы 20 мм. Весной к началу вегетации озимых различия запасов влаги в верхнем двадцатисантиметровом и даже в полуметровом слоях почвы у озимых, посеянных по парам и беспарью, практически сглаживаются (табл. 66). По результатам наблюдений Краснокутской станции полностью выявить влияние различных паров на водный режим почвы не представляется возможным в связи с отсутствием материалов о влажности слоев почвы глубже 50 см. В условиях этой станции в положительную сторону выделяется черный и в несколько меньшей мере чистый пар, запасы влаги которых в пахотном слое почвы в большинстве лет являются достаточными для удовлетвори-

Таблица 66

Средние за 1929—1932 гг. запасы продуктивной влаги в почве различных паров, беспарья и под посеянной по ним озимой рожью. Краснокутская сельскохозяйственная опытная станция

Срок определения влажности почвы	Слой почвы 0—20 см			Слой почвы 0—50 см		
	ранний пар (вспашка в начале мая)	поздний пар (вспашка в начале июля)	беспарье (вспашка немедленно после уборки яровой пшеницы)	ранний пар (вспашка в начале мая)	поздний пар (вспашка в начале июля)	беспарье (вспашка немедленно после уборки яровой пшеницы)
При вспашке пара раннего (начало мая)	26	23	26	69	63	69
среднего (начало июня)	24	21	19	52	52	52
позднего (начало июля)	21	6	4	58	28	16
При посеве озимых	20	7	5	58	21	16
При весеннем отрастании озимых	26	27	24	76	76	69
В полную спелость озимой ржи	4	1	1	28	10	10

тельного состояния всходов. По заключению этой станции, уже средний пар является в этом отношении недостаточно надежным, не говоря о позднем и занятых парах. В сухие годы особое преимущество в накоплении влаги имеет черный пар. Так, в сухом 1923 г. запасы влаги к моменту сева по этому пару в пахотном горизонте составляли 26 мм, в то время как на раннем пару они равнялись 19 мм, на среднем, занятом и позднем — 10—12 мм, а на беспарье — всего 3 мм. В том, что черный пар обеспечивает достаточные запасы влаги в верхнем слое почвы ко времени сева даже в наиболее сухие годы, и заключается его преимущество перед другими парами в борьбе с засухой. Из многолетних опытов Краснокутской станции следует, что влияние пара распространяется не только на посеянную по нему озимь, но и на последующую за ней яровую пшеницу [100, 149].

Материалы исследований Бузулукской сельскохозяйственной опытной станции, расположенной также в Заволжье на территории Оренбургской степи, показывают, что в условиях этой степи ранние пары — большая возможность иметь устойчивые урожаи озимой ржи, но их преимущество на ржи и кончается [15, 16].

Исследования, проведенные ЦИП на территории Заволжья в последние годы, не разошлись с результатами исследований предыдущих лет. Так, работами на территории Поволжской агролесомелиоративной станции (АГЛОС), расположенной неподалеку от Безенчука, было установлено, что чистый пар по сравнению с сельскохозяйственными культурами обеспечивает наличие значительно больших запасов влаги в почве к середине августа (к началу сева озимых). В 1952 г. на пару в пахотном слое почвы к этому времени имелось 18 мм влаги, в метровом — 111 мм; в это же время под сельскохозяйственными культурами в пахотном слое почвы запасы влаги не превышали 8 мм (табл. 67, [124]), под яровой пшеницей составляли всего 1 мм, а в метровом слое — 40 мм.

Таблица 67

Запасы продуктивной влаги (мм) под покровом различных сельскохозяйственных культур и на чистом пару 1952 г., АГЛОС

Культура	V	VI			VII			VIII		
	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

В слое почвы 0—20 см

Яровая пшеница . . . . .	34	27	12	2	12	3	1	1	1	0
Просо . . . . .	35	38	28	20	18	12	5	0	5	8
Подсолнечник . . . . .	34	33	30	24	26	16	4	4	3	1
Чистый пар . . . . .	31	32	30	26	30	26	28	18	18	24

В слое почвы 0—100 см

Яровая пшеница . . . . .	159	132	97	64	50	32	26	21	38	34
Просо . . . . .	159	154	142	106	106	87	60	41	40	37
Подсолнечник . . . . .	150	148	129	133	132	101	50	44	34	38
Чистый пар . . . . .	142	134	133	136	121	130	140	128	111	102

Исследования, проведенные ЦИП на территории Оренбургской степи (ст. Елшанка, Бузулукского района, Оренбургской области), дали аналогичные результаты [134, 176].

Опыт применения системы мероприятий по борьбе с засухой в колхозах Ново-Анненского района Волгоградской области показал, что на их территории действенным средством в улучшении условий водоснабжения растений являются черные пары. Даже в период июньско-июльской засухи 1956 г. запасы в метровой толще почвы на отдельных полях, обрабатываемых по системе черного пара, составляли 172 мм продуктивной воды. На раннем пару запасы влаги были на 70—80 мм меньше. В отдельные годы с достаточными осадками в предпосевной и посевной периоды возможен посев озимых также по непаровым предшественникам и по поздно вспаханным парам. По запасам влаги в почве поля из-под кукурузы, своевременно убранной на силос, являются наилучшими из занятых паров [259].

О роли чистых паров в водном режиме почв в районах глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и неустойчивой зимы можно судить по многолетним данным Синельниковской агрометеорологической станции (см. рис. 24). Как видно на этом рисунке и как об этом говорилось ранее, ко времени посева озимых на чистом пару в метровом слое почвы этой станции, по многолетним средним, содержится 126 мм продуктивной воды, примерно на 70 мм больше, чем на полях, занятых культурами.

Почти такие же соотношения в запасах влаги между чистым паром и полями, занятыми сельскохозяйственными культурами, в осенний период имеются и по другим как более северным (Полтава), так и самым южным (Одесса) станциям этой зоны. В табл. 68 представлены среднемноголетние запасы продуктивной влаги на чистом пару и под яровой пшеницей ко времени ее уборки. Если приравнять запасы влаги под яровой пшеницей ко времени ее уборки с поля к запасам влаги по беспарью, то можно считать, что разница в запасах влаги метрового слоя между чистым паром и беспарьем к этому времени в самых южных районах составляет около 60 мм (Одесса), в более северных (Синельниково, Полтава) — около 80 мм.

Следует при этом отметить сильную иссушенность по беспарью пахотного горизонта: на полях, только что освободившихся от культуры, среднемноголетние запасы продуктивной влаги этого слоя почвы составляют всего лишь 10 мм, в то время как на чистом пару они даже в наиболее южных районах превышают 20 мм.

В южной части степи Украины почти в каждом четвертом году по непаровым предшественникам из-за пересыхания верхних слоев почвы наблюдается запаздывание всходов озими, в связи с чем урожайность культур резко снижается [111].

Весной в районах глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и неустойчивых зим дефицит почвенной влаги за счет осадков, выпадающих в осенне-зимний период, и за счет талых вод в большинстве лет погашается. В результате этого весной, по средне-

Среднеголетние запасы продуктивной влаги (мм) на чистом пару и под озимыми, посеянными по чистому пару и беспарью

Слой почвы (см)	Полтава		Синельниково		Одесса	
	Осенью во время уборки ранних яровых					
	чистый пар	стерня ран- них яровых	чистый пар	стерня ран- них яровых	чистый пар	стерня ран- них яровых
0—20	35	11	30	9	24	10
0—50	79	28	69	19	54	16
0—100	145	59	121	37	106	49

Слой почвы (см)	Весной при возобновлении вегетации озимых					
	озимые по чистому пару	зябь из-под ран- них яровых	озимые по чистому пару	зябь из-под ран- них яровых	озимые по чистому пару	зябь из-под ран- них яровых
0—20	44	48	47	51	29	31
0—50	100	96	98	105	68	70
0—100	175	150	169	161	133	127

Примечание. Стерня ранних яровых и зябь из-под ранних яровых приравнены к беспарью.

многолетним данным, существенных различий в запасах влаги между полями с озимыми культурами, высеванными по чистому пару, и полями с зяблевой пахотой не наблюдается (табл. 68).

По обобщению, сделанному А. П. Федосеевым на основе материалов Полтавской агрометеостанции, в лесостепной зоне Украины озимые хлеба, посеянные по чистому пару, даже в исключительно засушливые годы (1938—1939) выходят весной с хорошими запасами влаги. Поля с зяблевой пахотой выходят весной промоченными на метр и глубже в 75 % лет, более чем на полметра — в 22 % и промоченными менее чем на полметра — в 3 % лет.

В зоне дерново-подзолистых почв и высокого стояния почвенно-грунтовых вод, исключая крайне редкие сухие годы, всходы озимых всегда обеспечиваются влагой, поэтому роль чистых паров здесь сходит на нет. По данным восьмилетних опытов, проведенных в 1951—1958 гг. Институтом земледелия нечерноземной полосы совместно с Немчиновской агрометеостанцией, по мере развития вегетативной массы парозанимающей культуры запасы влаги на занятых парах несколько уменьшаются по сравнению с чистым паром. Однако после уборки парозанимающей культуры благодаря значительному количеству осадков и уменьшению испарения влаги из почвы в конце лета запасы быстро восстанавливаются и ко времени сева озимых и последующего их роста выравниваются с запасами влаги на чистых парах [71].

К таким же выводам приводят данные опытов с разного вида парами Вятского опытного поля, Владимирского опытного поля и опытного поля Петровской (Тимирязевской) сельскохозяйственной академии, проведенные в прежние годы [151]. Эти же положения в отношении целесообразности применения занятых паров под посевы озимых культур в нечерноземной зоне отмечены в работе А. М. Алпатьева и В. М. Бейлиса [9].

В засушливых районах северной половины Казахстана и Кулунды система паровой обработки почвы применяется под яровые культуры, главным образом под яровую пшеницу. Применение паровой обработки под яровые позволяет использовать осадки холодного периода в течение двух лет: в осенне-зимний период, предшествующий парованию, и в осенне-зимний период, предшествующий посеву яровых культур на паровавшем поле. Условия водоснабжения яровой пшеницы, посеянной по паровому предшественнику, здесь складываются намного благоприятнее, чем по другим предшественникам. Особенно ярко различия проявляются в репродуктивный период. По исследованиям ЦИП, проведенным на ст. Шортанды Целиноградской области, в сильно засушливом 1955 г. под пшеницей, посеянной по пару, ко времени всходов запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы составили 34 мм,

Таблица 69

Запасы продуктивной влаги (мм) под яровой пшеницей, посеянной по разным предшественникам. Ст. Шортанды Целиноградской области

Предшественник	Слой почвы (см)	V			VI			VII			VIII
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
1955 г.											
Кулисный пар . . . . .	0—20	39	29	—	18	11	5	4	7	1	2
	0—100	120	123	—	119	104	83	76	53	37	32
Яровая пшеница . . . . .	0—20	30	30	25	18	7	4	2	4	4	0
	0—100	93	89	78	80	49	32	24	13	14	10
Пласт многолетних трав	0—20	25	21	—	10	0	0	0	5	2	0
	0—100	55	45	—	48	15	16	14	14	18	13
1956 г.											
Чистый пар . . . . .	0—20	20	24	26	25	22	14	3	1	3	1
	0—100	83	85	88	92	89	81	50	43	27	22
Яровая пшеница . . . . .	0—20	24	32	24	32	23	18	0	1	0	0
	0—100	46	58	58	59	47	31	11	14	8	8
Пласт многолетних трав	0—20	28	34	27	33	23	5	1	3	4	1
	0—100	54	66	65	63	51	24	9	6	6	2

в метровом — 122 мм, в то время как под пшеницей, посеянной по пласту трав, они равнялись в пахотном слое 22 мм, в метровом — 55 мм и под пшеницей, посеянной по пшенице же, в пахотном слое — 30 мм и в метровом — 91 мм (табл. 69).



Разница во влагозапасах метрового слоя сохранялась на протяжении всего периода вегетации. Так, в 1955 г. ко времени выхода в трубку продуктивной влаги в метровом слое почвы имелось: под пшеницей, посеянной по пару, 104 мм, посеянной по пшенице 49 мм и посеянной по пласту трав всего лишь 15 мм. Ко времени колошения влагозапасы соответственно составляли: 76, 24 и 14 мм (рис. 35).

Большие различия в водоснабжении растений сильно отразились на состоянии и урожае пшеницы (табл. 70). Пшеница, произраставшая по пласту трав, оказалась более чем наполовину невыколовшейся либо пустоколосой, количество незерненных колосков в колосе достигало почти 70%, а в озерненных колосьях

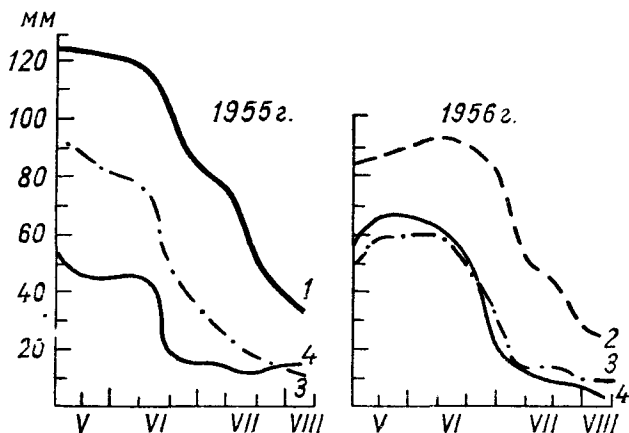


Рис. 35. Динамика запасов продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под яровой пшеницей, посеянной по пару и другим предшественникам.

1 — кулисный пар, 2 — чистый пар, 3 — яровая пшеница, 4 — пласт многолетних трав.

число зерен в среднем не превышало четырех. Высота растений не достигала даже 30 см, урожая практически не было. Несколько лучшие показатели структуры урожая были у пшеницы, посеянной по пшенице. У пшеницы же, произраставшей по пару, где условия водоснабжения в течение всего периода вегетации были существенно лучше, невыколовшихся или незерненных растений почти не было, число зерен в колосе в среднем достигало 15, а урожай даже в исключительно засушливом 1955 г. был 7 ц/га (при 4,4 ц/га у пшеницы, произраставшей по пшенице, и 1,0 ц/га у пшеницы, произраставшей по пласту трав).

Эффективность чистых и особенно кулисных паров в улучшении условий водоснабжения и в создании устойчивых урожаев яровой пшеницы в очень засушливых районах северной половины Казахстана, в Кулунде, так же как и в засушливых районах Заволжья, отмечается многими исследователями [73, 17, 206, 211, 212, 61].

Изучение влияния способов обработки пара на водный режим почвы полей, идущих под посевы яровой пшеницы, показало, что

**Структура и урожай зерна яровой пшеницы (сорт Шортандинка).  
Ст. Шортанды, Целиноградской области**

Предшественник	Высота растений (см)	Количество растений на 1 м <sup>2</sup>	Число невыклевшихся растений (%)	Количество озеренных стеблей на 1 м <sup>2</sup>	Количество колосков в колосе	Число невыклевшихся колосков в колосе (%)	Количество зерен в колосе	Вес 1000 зерен (г)	Урожай (ц/га)
<b>1955 г.</b>									
Кулисный пар . . . . .	43	226	4	218	13	34	15	26	7,1
Яровая пшеница . . . . .	31	368	17	305	10	52	7	22	4,4
Пласт многолетних трав <sup>1</sup>	29	195	55	88	11	68	4	28	1,0
<b>1956 г.</b>									
Чистый пар . . . . .	48	239	1	242	16	28	18	30	11,1
Яровая пшеница . . . . .	36	208	34	146	14	64	8	24	3,7
Пласт многолетних трав	37	252	52	116	14	69	7	23	1,9

<sup>1</sup> По пласту трав была посеяна твердая пшеница Акмолинка 5.

в год парования запасы продуктивной влаги почти одинаковы как на парах, вспаханных отвальным плугом с почвоуглубителем и без него, так и на парах, обработанных безотвальным плугом Мальцева. Лишь в период выпадения обильных осадков имеет место некоторое увеличение влажности почвы на пару, обработанном безотвальным плугом, однако оно весьма кратковременно.

Изучение режима влажности почвы под яровой пшеницей, высеянной по различно обработанным чистым парам, также не дало закономерных различий между указанными выше вариантами обработки. В первую половину вегетации запасы влаги в пахотном слое по глубокой безотвальной вспашке были несколько выше, чем по обычной обработке, в метровом же слое они были одинаковы и лишь в отдельные периоды несколько превышали запасы по обычной обработке.

Не имелось различий и в величине урожая: по обычно обработанному пару урожай составлял 11,1 ц/га, по безотвальному пару — 11,8 ц/га.

Таким образом, как в период парования, так и в период роста яровой пшеницы ярко выраженных преимуществ того или другого вида обработки пара не обнаружено.

На основе результатов описанных выше исследований и физической сущности влияния чистых паров на водный режим почв их агрометеорологическую эффективность на территории СССР можно представить в следующем виде (применительно к мелкоземистым почвам).

Зоной наибольшей эффективности чистых паров, с превышением запасов влаги ко времени сева озимых по сравнению с беспарьем

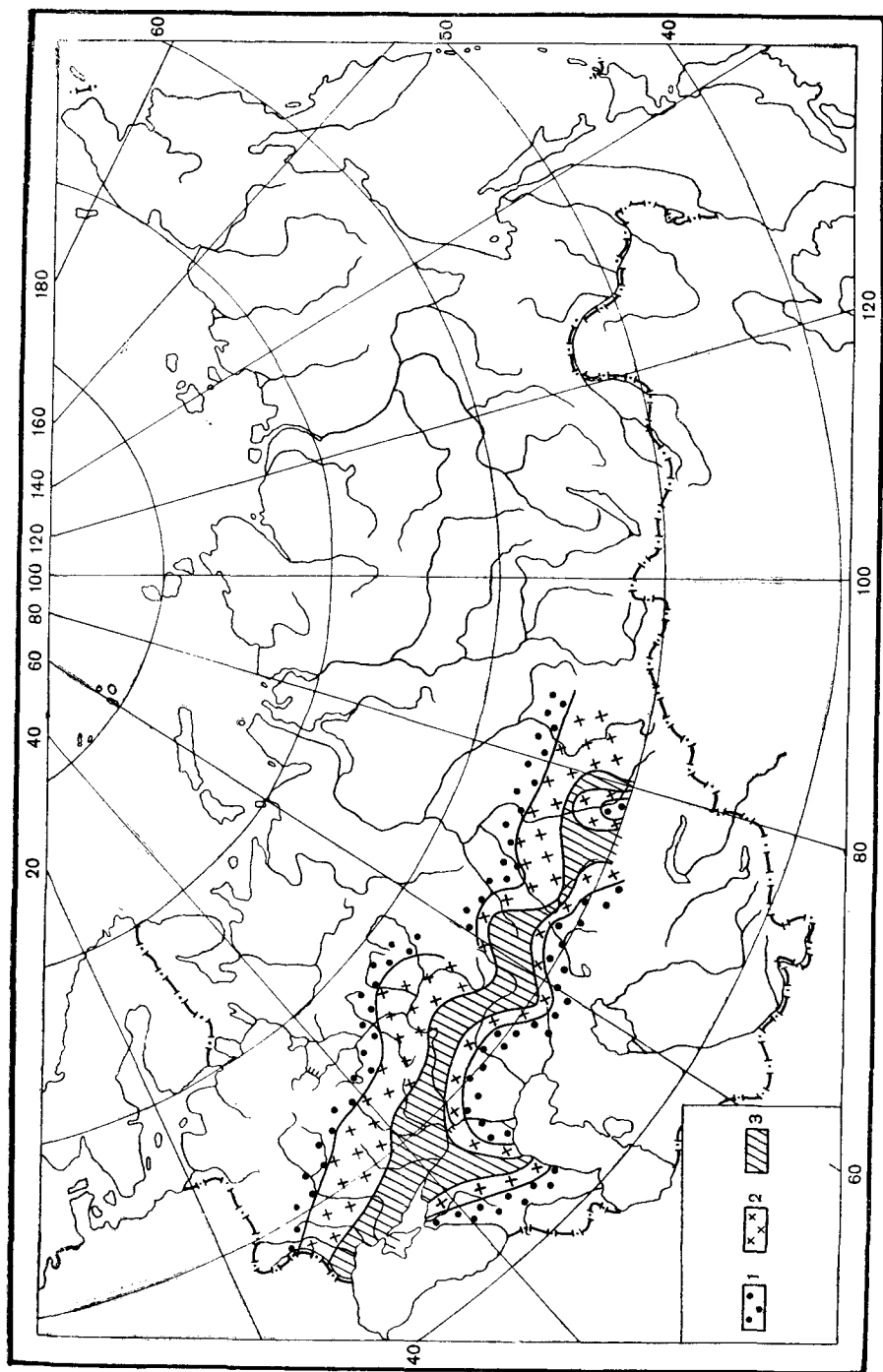


Рис. 36. Агрогидрологическая эффективность чистых паров. Превышение запасов влаги (мм) в метровом слое чистых паров по сравнению с беспарьем ко времени сева озимых: 1 — меньше 40 мм, 2 — 40—70 мм, 3 — 70—100 мм.

на 70—100 мм, является зона черноземных почв (рис. 36). В ту и другую сторону от нее эффективность паров снижается. В северных лесостепных районах это обусловлено выпадением большего количества осадков и меньшим испарением влаги из почвы вследствие более низкой испаряемости, в результате чего ко времени сева озимых по запасам влаги занятые пары не очень резко отличаются от чистых. В сухостепных и полупустынных районах чистые пары не дают высокой эффективности потому, что осадки здесь незначительны, испарение же влаги из почвы очень интенсивное в силу высокой испаряемости.

В этой связи в лесостепных районах, характеризующихся лучшим увлажнением почвы, представляется целесообразным чистые пары сочетать с занятыми, притом соотношение площадей с тем и другим видом пара менять в зависимости от агрометеорологических условий года. Если запасы продуктивной влаги к началу сева парозанимающих культур недостаточные (меньше 80 мм в метровом слое), то посева на полях лучше не производить, а оставлять их под чистые пары; если запасы влаги удовлетворительные и хорошие, то использовать поля под занятые пары.

В степных и сухостепных районах мобильную агротехнику целесообразно применять по отношению идущей по чистым парам сельскохозяйственной культуры: при хороших влагозапасах чистые пары использовать под посев озимых, при недостаточных — оставлять под посевы яровых будущего года.

### **Агрогидрологическая роль системы обработки зяби**

Важнейшим звеном в системе обработки под яровые является обработка зяби. Воздействие зяблевой обработки на формирование запасов влаги в основном сводится к следующему. Зяблевая обработка исключает потери влаги на транспирацию сорняков в остающуюся после уборки культуры теплую часть года (конец лета, осень). На полях, вышедших из-под многолетних трав, а также на целинных и залежных землях она исключает и огромные потери влаги из почвы на транспирацию травянистой растительности. Создаваемый зяблевой обработкой рыхлый слой почвы в силу своей повышенной влагоемкости и водопроницаемости способствует более полной аккумуляции выпадающих осадков и талых вод и в то же время благодаря образованию мульчирующего слоя снижает потери влаги из почвы на испарение.

Значение зяблевой вспашки в различных почвенно-климатических зонах неодинаково. В районах с малой длительностью послеуборочного периода и незначительным выпадением в это время осадков зяблевая вспашка в отношении увеличения запасов влаги в почве не имеет преимуществ перед весновспашкой, особенно при наличии сильной эрозии почв. Наоборот, оставление на зиму стерни благодаря задержанию снега и предохранению полей от выдувания обеспечивает к весне существенное пополнение запасов почвенной влаги талыми водами.

Отрицательной стороной весновспашки повсеместно является вынужденная задержка в сроках сева яровых вследствие большого объема работ весной по подготовке почвы к севу, что нередко влечет за собой иссушение верхних слоев почвы и ухудшение влагообеспеченности растений в ранние периоды их роста. Следует, однако, отметить, что в современных условиях эта опасность значительно снижается благодаря хорошему оснащению сельскохозяйственного производства машинной техникой.

В засушливых районах с длительным и теплым послеуборочным периодом подъем зяби при ранних его сроках или послеуборочном лущении имеет большие преимущества перед весновспашкой.

В системе зяблевой обработки существенную роль играют сроки ее проведения. Многолетние опыты Безенчукской сельскохозяйственной станции показали, что раннее лущение стерни (вскоре после уборки) в сочетании с сентябрьской и октябрьской вспашкой обеспечивают увеличение запасов влаги в метровом слое почвы ко времени сева яровых на 40 мм (в среднем за 10 лет). Ранняя вспашка (также вскоре после уборки) без последующих обработок увеличивает запасы влаги к весне в среднем на 14 мм. Более же поздний подъем зяби, в сентябре или октябре, без предшествующего лущения стерни эффекта в отношении увеличения запасов влаги в почве не дает [231].

В южной части Украины, характеризующейся длительной и теплой осенью, по данным ст. Одесса, в среднем за 25 лет к 1 X под стерней зерновых в метровом слое почвы содержится 12 мм продуктивной влаги. На поле, взлущенном непосредственно после уборки зерновых, на эту же дату запасы влаги в метровом слое в среднем составляют 38 мм, т. е. раннее лущение стерни в этих районах увеличивает запасы почвенной влаги на 26 мм [111].

Существенное значение в водном режиме почв в засушливых районах играет глубина вспашки зяби. По многолетним данным Безенчукской станции, имеет преимущество более глубокая вспашка. Ко времени сева яровых запасы влаги в метровом слое почвы на зяби, вспаханной на глубину 20—22 см, в среднем за 14 лет на 26 мм больше, чем на мелкой зяби, вспаханной на глубину 11—13 см. В отдельные годы разница в запасах влаги на полях глубокой и мелкой вспашкой достигает 86 мм, а между мелкой и средней (вспашка на глубину 16—18 см) — 66 мм.

Особенно требовательны к срокам зяблевой обработки сильно иссушенные поля из-под многолетних трав и угодья с естественной травянистой растительностью. По данным Безенчукской и Краснокутской опытных станций, после посева яровых влажность как в верхних, так и в глубоких слоях почвы по рано поднятому пласту (август) бывает всегда значительно выше, чем при позднем его подъеме (сентябрь—октябрь), причем различия эти сохраняются в течение всего периода вегетации яровых.

Особенно ярко это показали исследования, проведенные в период освоения целинных и залежных земель. На ст. Шортанды

Целиноградской области весной 1955 и 1956 гг. на целине запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы составляли около 100 мм. С началом вегетации в связи с большими расходами влаги на транспирацию отрастающей растительностью они быстро уменьшались. В засушливом 1955 г. запасы были полностью исчерпаны в конце июня, в более влажном 1956 г. — в конце июля. В таком иссушенном состоянии невспаханная целина находилась оба года до конца вегетационного периода, до укрытия ее снегом (рис. 37). На вспаханной же в конце мая 1955 г. целине, где запасы метрового слоя почвы составляли к этому времени 69 мм, на таком же практически уровне, 66 мм, они оставались до начала зимы (табл. 71).

Таким образом, ранние сроки подъема целины дают возможность сохранить в почве под посев будущего года по сравнению с поздней вспашкой большое количество влаги, 60 мм и более. Как показали исследования в засушливых районах Казахстана и в Кулундинской степи, аналогичный эффект дают ранние сроки подъема пласта многолетних трав (вспашка после первого укоса) и подъема дернины на залежных землях [183].

Существенное значение имеют и способы обработки дернины. Исследования проводились в Шортандах Целиноградской области в двух вариантах: на целине, обработанной обычным способом —

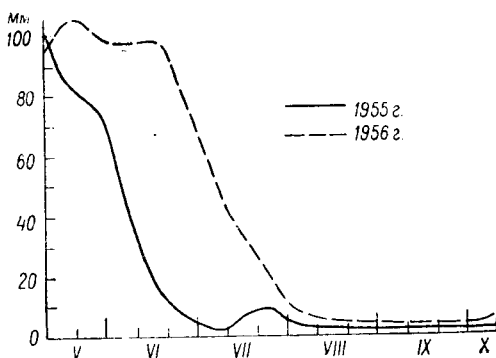


Рис. 37. Динамика запасов продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы на целине (с. Шортанды Целиноградской области).

Таблица 71

Запасы продуктивной влаги (мм) в почве нетронутой целины в 1955 г.  
Ст. Шортанды

Слой почвы (см)	8 V	20 V	29 V	10 VI	23 VI	30 VI	13 VII	26 VII	6 VIII	9 X
0—10	18	9	3	0	0	0	0	0	0	0
0—20	35	21	11	2	0	0	0	0	0	0
0—50	78	58	40	13	2	0	0	0	0	0
0—100	100	86	69	30	5	0	0	0	0	0

отвальной вспашкой с предплужником весной (27 V) на глубину 25 см и безотвальной глубокой вспашкой (40 см) осенью (27 VIII), с предварительным дискованием в один след тяжелой бороной весной (27 V) и в два следа на глубину 10 см осенью (27 VIII). При

обоих видах обработки поднятая целина в условиях засушливого 1955 г. к концу осени потеряла около 25 мм воды из имеющихся в метровом слое к началу обработки 70 мм. Характерен, однако, тот факт, что на обоих участках сильному высыханию (до коэффициента увядания и ниже) подвергался верхний обрабатываемый слой: при плужной вспашке (глубина обработки 25 см) пересох слой 0—25 см, при дисковании пересох лишь слой, подвергшийся дискованию, т. е. десятисантиметровый.

Режим влажности почвы в поле с безотвальной вспашкой на глубину 40 см по продискованной один раз дернине резко отли-

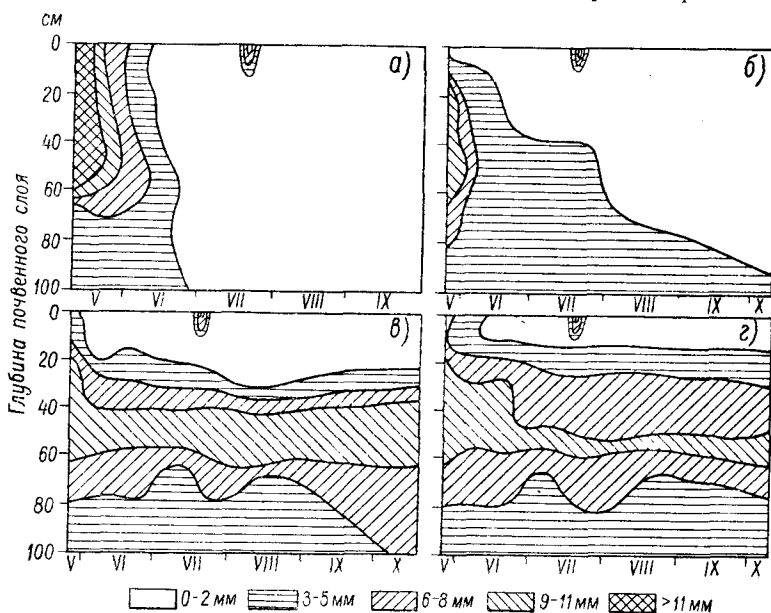


Рис. 38. Динамика запасов продуктивной влаги в почве при различных способах обработки целины под посев следующего года (Шортанды Целиноградской области, 1955 г.).

а — необработанная целина, б — дискование в один след на глубину 8 см 27 VII, в — отвальная вспашка с предплужником на глубину 25 см 27 V, г — дискование в два следа на глубину 10 см 27 V и дискование в два следа на глубину 10 см 27 VIII.

чался от режима других полей. За период с момента весеннего дискования (27 V) до августовской безотвальной вспашки метровый слой почвы потерял 60 мм водных запасов. К концу осени в почве здесь почти полностью отсутствовала продуктивная влага, т. е. почва была в таком же иссушенном состоянии, как и на необработанной целине (рис. 38).

Зимой 1956 г. на опытных участках было произведено снегозадержание риджерным снегопахом, которое обеспечило накопление воды в снеге около 120—140 мм. В результате после снеготаяния на всех участках с различными видами обработки запасы влаги в почве резко повысились. Однако величина прибавок и количе-

ство влаги в почве весной были неодинаковы. На участке с обычным способом подъема целины отвальным плугом к 5 V в метровом слое содержалось 146 мм продуктивной влаги, прибавка составила 90 мм, на участке с поздней безотвальной вспашкой — соответственно 102 и 97 мм и на участке с дискованием — 92 и 37 мм. Пахотный слой почвы везде был насыщен до наименьшей влагоемкости. Вследствие часто выпадавших дождей запасы продуктивной влаги в нем в период от посева до выхода в трубку по всем видам обработки составили 30—40 мм.

Таким образом, от посева до выхода в трубку, когда растения в основном используют влагу пахотного слоя почвы, условия водоснабжения яровой пшеницы при всех видах обработки были вполне благоприятными.

В дальнейшем наилучший режим влажности создавался на поле с обычной обработкой целины отвальным плугом, где весь метровый слой насытился до наименьшей влагоемкости. Наименее благоприятные условия водоснабжения создались на поле с однократным дискованием почвы весной и последующей ее обработкой безотвальным плугом только в августе, вследствие недоувлажнения нижних слоев, что отразилось на росте яровой пшеницы во вторую часть вегетационного периода. Примерно такие же условия водоснабжения в течение вегетации наблюдались и при посеве яровой пшеницы по целине, обработанной дискованием.

В результате лучших условий водоснабжения основные показатели структуры урожая на участке с обычным способом подъема целины оказались выше, урожай почти на 5 ц/га больше: 19,7 ц/га

Таблица 72

Структура и урожай зерна яровой пшеницы. Ст. Шортанды, 1956 г.

Способ подъема целины	Высота растений (см)	Количество невыкошенных растений (%)	Количество озерненных стеблей на 1 м <sup>2</sup>	Количество колосков в колосе	Количество незерненных колосков в колосе (%)	Количество зерен в колосе	Вес 1000 зерен (г)	Урожай (ц/га)
Отвальная вспашка на глубину 25 см 27 V	72	4	308	18	11	27	30	19,7
Дискование в один след на глубину 8 см 27 V плюс безотвальная вспашка на глубину 40 см 27 VIII . . . . .	61	2	297	18	22	23	27	15,1
Дискование в два следа на глубину 10 см 27 V плюс дискование в два следа на глубину 10 см 27 VIII . . . . .	64	2	281	19	21	23	28	14,9



по сравнению с 15,1 ц/га при посеве по поздней безотвальной вспашке и 14,9 ц/га по дискованию (табл. 72).

Таким образом, по данным описанного опыта, дискование и безотвальная вспашка вследствие присущей им недостаточно качественной обработки дернины и больших расходов воды на транспирацию при отрастании дернины являются менее пригодными по сравнению с обычной отвальной вспашкой.

Изучение влияния приемов обработки на водный режим почвы и влагообеспеченность яровой пшеницы при выращивании ее во

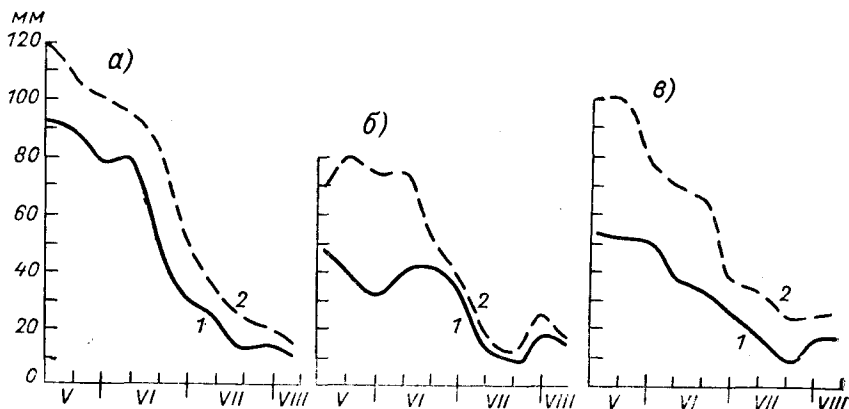


Рис. 39. Динамика запасов продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под яровой пшеницей, посеянной по отвальной (1) и безотвальной (2) зяблевой вспашке.

а — ст. Шортанды, 1955 г., б — ст. Шортанды, 1956 г., в — ст. Ключи, 1957 г.

второй, третий и последующие годы после подъема дернины, а также на старопахотных землях в районах с сильной ветровой деятельностью выявило большое значение времени и способов заделки стерни.

На полях, вспаханных безотвальным плугом с осени, запасы влаги в почве существенно выше по сравнению с обычной осенней вспашкой. Максимальная разница отмечается в первую часть вегетационного периода (в метровом слое почвы достигает 40 мм), во вторую часть периода она постепенно сглаживается (рис. 39).

На полях с глубокой безотвальной вспашкой в период, предшествующий выходу в трубку, запасы влаги пахотного слоя на 10—15 мм больше, чем по отвальной вспашке. В связи с этим здесь наблюдается лучшее укоренение растений (в среднем на растение на 2—3 узловых корня больше) и лучшее их состояние.

В соответствии с лучшими условиями водоснабжения все основные показатели структуры урожая яровой пшеницы по безотвальной зяблевой вспашке ежегодно были лучше, чем по обычной. Особенно значительные различия наблюдались в озерненности колоса и в абсолютном весе зерна. Урожай по безотвальной вспашке был на 2—5 ц/га выше (табл. 73).

## Структура и урожай зерна яровой пшеницы по различно обработанной зяби

Вид зяблевой вспашки	Год наблюдений	Высота растений (см)	Количество колосков в колосе	Количество незерненных колосков в колосе (%)	Количество зерен в колосе	Вес 1000 зерен (г)	Урожай (ц/га)
Ст. Шортанды							
Отвальная . . . . .	1955	31	10	52	7	22	4,4
Безотвальная . . . . .		41	13	25	18	27	10,0
Отвальная . . . . .	1956	32	12	42	10	23	2,4
Безотвальная . . . . .		36	14	42	13	25	4,1
Ст. Ключи							
Отвальная . . . . .	1956	64	13	31	16	16	7,0
Безотвальная . . . . .		71	14	21	21	18	9,3
Отвальная . . . . .	1957	37	11	27	13	27	5,6
Безотвальная . . . . .		44	12	25	15	32	8,6

Положительное влияние безотвальной вспашки, производимой осенью, в первую очередь проявляется в том, что безотвальный плуг оставляет в стоячем положении большую часть стерни, обеспечивая задержание снега зимой, а также медленное и равномерное его таяние весной. Кроме того, стерня снижает расход влаги на поверхностное испарение почвы после освобождения полей от снега, а глубокое рыхление облегчает проникновение талых вод вглубь.

Следует, однако, оговорить, что оставшаяся на полях стерня нередко является причиной большой их засоренности. Поэтому применение этого приема агротехники обычно ограничивается районами с сильной ветровой эрозией.

Обработка почвы после уборки зерновых культур дискованием, произведенным осенью, не дает явно выраженных преимуществ по сравнению с обычной зяблевой пахотой. По зяблевой пахоте и осеннему дискованию водный режим почвы и условия водоснабжения пшеницы почти одинаковы (рис. 40). Причина, очевидно, в том, что дискование стерни осенью исключает возможность задержания ею снега зимой. В результате по этим видам обработки показатели структуры и сами урожаи мало отличаются друг от друга.

Оставленные на зиму на вспаханной отвальным плугом зяби кулисы из стерни яровой пшеницы высотой 25—30 см (ширина кулис 15 м, ширина межкулисных полос 30—40 м) даже в условиях малоснежной зимы благодаря снегозадержанию обеспечивают накопление в почве продуктивной влаги приблизительно на 40 мм больше, чем при отвальной зяблевой вспашке (рис. 41). В соот-

ветствии с этим образование вторичных корней, прирост растений в высоту, налив зерна и другие показатели состояния посеянной по кулисам пшеницы значительно лучше, чем без кулис, урожай на 1,5—2 ц/га выше (табл. 74).

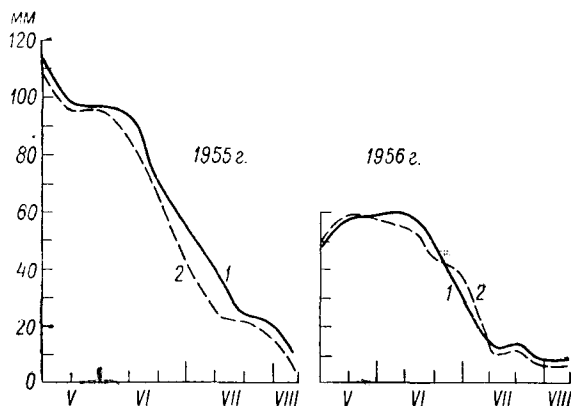


Рис. 40. Динамика запасов продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под яровой пшеницей по отвальной зяблевой вспашке и осеннему дискованию (ст. Шортанды Целиноградской области).

1 — зяблевая отвальная вспашка, 2 — осеннее дискование

Кроме стерневых кулис, большим преимуществом которых является то, что они начинают накапливать снег с первых же снегопадов и не требуют дополнительных затрат труда на их устрой-

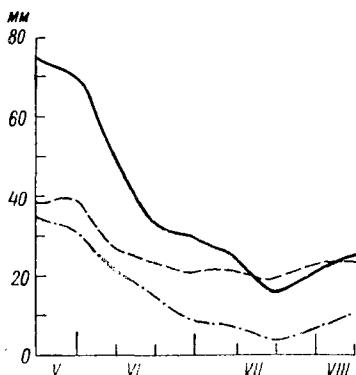


Рис. 41. Динамика запасов продуктивной влаги (мм) под яровой пшеницей, посеянной по стерновым кулисам в 1957 г. (ст. Ключи Алтайского края).

1 — кулисы, 2 — межкулисные полосы, 3 — без кулис.

ство, для задержания снега на полях широко используются высокостебельные растения: кукуруза, подсолнечник, горчица и др.

По данным Краснокутской опытной станции, в засушливых районах Заволжья задержание снега кулисами подсолнечника к посеву яровой пшеницы увеличивает запасы влаги в метровом слое

почвы более чем на 40 мм, главным образом из-за проникновения талых вод в нижние слои почвы (глубже 50 см, табл. 75).

Таблица 74

Структура и урожай зерна яровой пшеницы. Ст. Ключи Алтайского края, 1957 г.

Место наблюдений	Высота растений (см)	Количество колосков в колосе	Количество неозерненных колосков в колосе (%)	Количество зерен в колосе	Вес 1000 зерен (г)	Урожай (ц/га)
Кулисы . . . . .	39	11	27	14	25	5,5
Межкулисные полосы	25	10	50	7	21	2,1
Сплошной массив . . .	30	10	40	8	22	3,9

Таблица 75

Запасы продуктивной влаги (мм) перед посевом яровой пшеницы в поле со снегозадержанием кулисами подсолнечника и без кулис. Краснокутская сельскохозяйственная станция, 1929—1939 гг.

Место наблюдений	Слой почвы (см)			
	0—20	0—50	50—100	0—100
Вблизи кулис				
с северной стороны . . . . .	30	50	79	129
с южной стороны . . . . .	35	60	87	147
В межкулисном пространстве . . .	35	53	77	130
В среднем на поле				
с кулисами . . . . .	33	54	81	135
без кулис . . . . .	31	48	44	92
Прибавка запасов влаги в почве при снегозадержании . . . . .	2	6	37	43

В Западной Сибири (Алтайский край) эффективность снегозадержания высокостебельными кулисами еще больше. По данным Барнаульской станции [257], прибавка запасов влаги в метровом слое почвы в отдельные годы достигает 93 мм (табл. 76), по данным Славгородской опытной станции — 100 мм.

Эффективность снегозадержания кулисами зависит от условий погоды, характера и состояния кулис и дефицита запасов влаги в почве осенью. Чем больше дефицит и чем больше выпадает твердых осадков, тем эффективнее снегозадержание. В тех случаях, когда запасы воды в снежном покрове и без снегозадержания достаточны для того, чтобы насытить почву до наименьшей влагоемкости, на полях со снегозадержанием избыток талых вод

Запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы в поле со снегозадержанием кулисами подсолнечника с горчицей и без кулис.  
Барнаульская агрометеостанция

Поле	1943-44 г.			1944-45 г.			1945-46 г.		
	осень	весна	при- бавка	осень	весна	при- бавка	осень	весна	при- бавка
Без снегозадер- жания . . . . .	116	131	15	98	105	7	88	108	25
Со снегозадержанием кулисами	115	180	65	95	139	44	84	177	93

будет просачиваться в подстилающий грунт (табл. 77, влажные годы).

Таблица 77

Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы и урожай яровой пшеницы в поле со снегозадержанием кулисами и без снегозадержания.  
Славгородская сельскохозяйственная опытная станция Алтайского края

Предшественник яровой пшеницы	В среднем за засушливые годы (1953, 1955)		В среднем за влажные годы (1954, 1956)	
	запасы влаги весной (мм)	урожай (ц/га)	запасы влаги весной (мм)	урожай (ц/га)
Пар				
без кулис . . . . .	35	4,9	90	20,0
с кулисами . . . . .	136	8,5	153	25,5
Зябь				
без кулис . . . . .	30	2,8	75	11,0
с кулисами . . . . .	121	6,3	152	13,7
Пласт многолетних трав				
без кулис . . . . .	45	3,1	78	13,6
с кулисами . . . . .	115	6,8	120	20,3
Стерня высокостебельных культур				
без кулис . . . . .	56	5,6	141	13,7
с кулисами . . . . .	168	9,6	200	20,1

Другим, широко распространенным в настоящее время способом снегозадержания является нарезка снежных валиков тракторными снегопахами. Благодаря высокой производительности этот прием доступен для применения на больших площадях. Снегозадержание с помощью снегопахов дает наибольший эффект в сочетании с другими приемами (оставленные на зиму стерня, кулисы и др.), так как его можно начинать лишь при наличии на полях снежного покрова высотой не менее 8—10 см.

Эффективность любого приема снегозадержания в значительной степени зависит от соотношения площади, на которой задерживается снег, к площади, с которой он собирается. Чем меньше площадь снегозадержания по отношению к площади снегосбора, тем это мероприятие эффективнее.

Для сокращения расходов влаги на испарение в последние годы во многих степных районах широко практикуется осеннее боронование язи, что способствует сбережению влаги к посеву яровых примерно в количестве 15—20 мм [94]. Такое же значение имеет и своевременное проведение весеннего боронования язи — укрытие влаги, которое намного сокращает испарение с поверхности почвы. Опоздание с весенним боронованием язи на 2—3 дня нередко приводит к большим потерям почвенной влаги, поскольку в этот период верхний слой почвы бывает всегда сильно увлажнен и потери влаги на испарение огромны.

Принципиально отличными от других мероприятий по улучшению водного режима почвы и условий водоснабжения сельскохозяйственных растений являются применение депрессоров и прикапывание почвы после посева.

Депрессоры — полимеры и сополимеры — являясь высокомолекулярными соединениями, вызывают коагуляцию почвенных коллоидов, образуют клееобразные вещества, скрепляющие распыленные частицы почвы в водонепроницаемые агрегаты, чем способствуют улучшению водно-воздушного режима почвы: снижают испарение, повышают впитывание осадков и исключают образование корки на поверхности почвы. В результате, по имеющимся в настоящее время экспериментальным данным, внесение депрессоров увеличивает влажность почвы (на 2—3%), ускоряет всхожесть семян и созревание растений (хлопчатника) и повышает урожай сельскохозяйственных культур в отдельных опытах до 30%.

Однако к настоящему времени проводимые исследования по внесению депрессоров в почву не доведены еще до стадии производственных испытаний, не говоря уже о применении их в практике и об экономической эффективности.

Широко применяемое в производстве прикапывание почвы после посева намного улучшает процесс использования влаги растением вследствие уплотнения почвы. В засушливых районах ко времени сева на глубине укладки семян легкоподвижной влаги часто бывает мало, а иногда и совсем не бывает. Вследствие этого передвижение воды в жидком виде здесь сильно затруднено и поступление ее в семена, а в последующем и в корешки растений может быть обеспечено лишь при условии достаточно большой поверхности соприкосновения тканей растений с окутанными водной пленкой почвенными частицами. Уплотнение взрыхленного при предпосевной обработке и во время сева верхнего слоя почвы способствует увеличению поверхности соприкосновения семян и корешков растений с почвой и тем самым увеличивает подачу воды, обеспечивает большую возможность капиллярного передвижения воды от близлежащих почвенных частиц к местам стыков семян и

корней растений с почвой. В результате описанного процесса при прикатывании создаются лучшие условия для набухания семян и образования корневой системы растений. Это соответствующим образом сказывается на урожаях. По литературным данным, в засушливых районах прикатывание значительно увеличивает, например, урожай яровой пшеницы. В засушливые годы прибавки составляют 3, 4 и даже 5 ц/га, притом на больших хозяйственных площадях [60].

Выше значение отдельных агротехнических приемов в регулировании водного режима почв и влагообеспеченности растений рассматривалось применительно к типичным условиям отдельных зон и районов. Следует, однако, учесть, что наряду с большими различиями в климате и гидрогеологических условиях отдельных зон и районов каждому из них присущи глубокие изменения метеорологических и агрогидрологических условий по годам. Это выдвигает необходимость дифференцировать агротехнические приемы по улучшению водного режима почв и влагообеспеченности растений не только по территории, но и во времени применительно к конкретным условиям каждого года, т. е. иметь мобильную агротехнику.

### **Влияние полезащитных лесных полос на режим влажности почвы и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур**

По данным большинства исследователей, полезащитное лесоразведение является действенным средством перестройки водного режима почв и улучшения условий водоснабжения сельскохозяйственных растений в засушливых районах нашей страны.

Положительное влияние лесных полос на водный режим почвы может осуществляться через снижение испарения в результате ослабления ветра вблизи защитных полос и через накопление и лучшее распределение снежного покрова.

Полезного действия на водоснабжение растений от снижения испарения вблизи защитных полос можно ожидать только при условии устойчивого увлажнения почвы: при наличии орошения или частых сильных дождей. В умеренно засушливых районах в соответствии с их обычно низкой влажностью почвы в течение лета ослабление ветра не может оказывать существенного влияния на испарение, а следовательно, и на водоснабжение растений: летний эффект полос ничтожен.

**Снегонакопительная роль лесных полос.** В степных и лесостепных районах, где имеют место сильные снегопады и переносы снега, а во время вегетационного периода почва обычно бывает очень сухой, увеличение влажности межполосного поля идет только за счет накопления снега: зимний эффект полос имеет решающее значение.

Влияние этого мероприятия в первую очередь проявляется в перераспределении и накоплении снега в межполосном поле, а также в характере промерзания и оттаивания почвы, снеготая-

ния, поглощения талых вод почвой и накопления в ней запасов воды.

Многочисленными исследованиями установлено, что лесополосы всех конструкций обуславливают большее накопление снега на полях по сравнению с открытой степью (в 1,5—2, а иногда даже в 3 раза). Однако характер распределения снежного покрова как в самих лесополосах, так и в прилегающих к ним пространствах сильно зависит от их продуваемости.

Лесополосы непродуваемой, плотной, конструкции, аккумулируя внутри и поблизости себя огромные массы снега, в том числе и

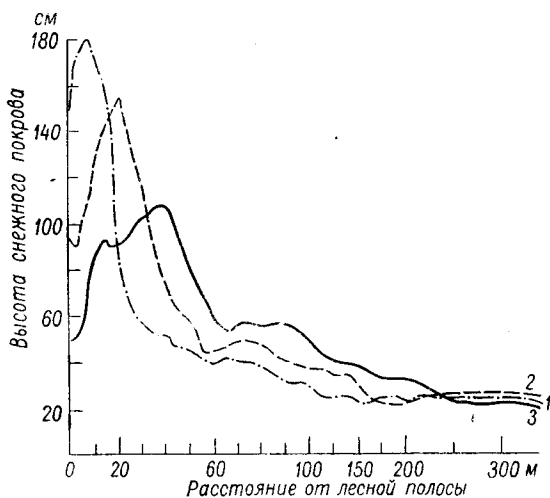


Рис. 42. Влияние полос различной конструкции на снегоотложение.

1 — непродуваемая, 2 — ажурная, 3 — продуваемая.

за счет «ограбления» межполосных пространств, не обеспечивают равномерного распределения снега на полях. Дальность действия таких полос в большинстве случаев ограничивается расстоянием, равным двух — пятикратной их высоте, на межполосных пространствах нередко наблюдаются совсем голые (без снега) участки.

В непродуваемых полосах при направлении метелевых ветров под прямым углом к лесным полосам снежные отложения образуют высокие сугробы как в самих полосах, так и на опушках. С наветренной стороны снегоотложение значительно меньше (рис. 42). Благоприятный эффект на распределение снега на полях, защищенных непродуваемыми полосами, оказывают кулисы из высокоствельных растений: под их воздействием распределение снега значительно выравнивается [74].

При непродуваемых лесополосах в межполосном поле долго остаются оголенными от снега участки, в этих местах отмечаются глубокое промерзание и низкие температуры почвы, особенно



в самых верхних ее слоях. Весной сход снежного покрова у непродуваемых лесных полос задерживается из-за высоких снежных сугробов как внутри, так и вблизи лесополос [134], рис. 43. Вследствие этого поспевание почвы вблизи непродуваемых полос наступает иногда на 10—15 дней позже, чем на остальном пространстве поля. Поэтому поле приходится засевать в разные сроки (у лесополос позже, чем на остальной части поля) либо же запаздывать с севом на всем межполосном поле, что отрицательно сказывается на урожаях, поскольку на большей части поля верхний слой почвы к этому времени уже пересыхает.

Продуваемые полосы оказывают снегонакапливающее действие на расстоянии, достигающем пятнадцати—двадцатипятикратной высоты и даже больше, и создают значительно более равномерное распределение снега по всему межполосному полю.

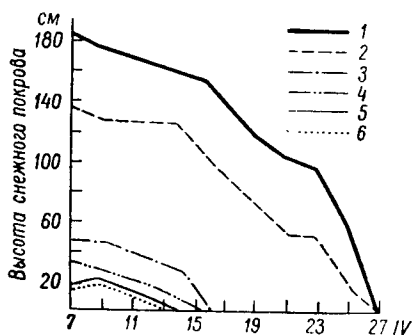


Рис. 43. Ход снеготаяния в различных частях межполосного поля (Оренбургская степь, 1952 г.).

1 — в лесополосе с наветренной стороны лесополосы, 2 — на расстоянии 15 м, 3 — на расстоянии 50 м с наветренной стороны лесополосы, 4 — на расстоянии 15 м, 5 — на расстоянии 50 м, 6 — в середине межполосного поля.

При защите полей продуваемыми полосами снег располагается более или менее равномерно почти по всему межполосному пространству (на расстоянии не менее 100 м), причем в самих лесополосах продуваемой конструкции снега накапливается в два-три раза меньше, чем в полосах непродуваемой конструкции. Под защитой продуваемых полос снежный покров почти на всем межполосном поле устанавливается одновременно.

Кроме конструкции, на процессах снегоотложения сильно сказывается система лесополос. В системе сформировавшихся высоких полезастных лесных полос снегозадержание и характер распределения снега в межполосном пространстве намного благоприятнее, чем при одиночных лесополосах: в лесостепных районах правобережья Волги, например, где взрослые лесные полосы достигают большой высоты (около 20 м), при системе полос протяженность их действия на снегоотложение достигает 350 м.

Опыт показывает, что система лесных полос, заложенных с учетом регулирования стока, может обеспечить почти полное поглощение талых вод. По данным шестилетних исследований в Каменной Степи, где водорегулирующая роль лесных полос изучалась путем закладки стоковых площадок, в период весеннего снеготаяния лесные полосы пятидесятилетнего возраста поглощают талые воды

в среднем в 10—12 раз интенсивнее, чем незащищенные полевые участки с зяблевой пахотой.

Кроме борьбы с поверхностным стоком, полезащитные полосы выполняют еще одну весьма важную функцию: под их воздействием нередко поднимается уровень грунтовых вод, что способствует улучшению условий водоснабжения растений как в самих лесополосах, так и в прилегающих к ним пространствах. Повышение уровня грунтовых вод обнаруживается преимущественно под действием уже сформировавшихся лесополос за счет пополнения почвы и грунта талыми водами и имеет место в районах с мягкими зимами и слабым выхолаживанием почвы при наличии соответствующих гидрогеологических условий.

**Влияние лесополос на режим и эффективность использования почвенной влаги сельскохозяйственными культурами.** В районах, характеризующихся устойчивой зимой и метелевыми ветрами, увлажнение почвы межполосных полей талыми водами находится в полном соответствии с характером распределения снежного покрова в межполосном поле и с дефицитом насыщения почвы влагой, а также с особенностями процесса снеготаяния и оттаивания почвы, определяемыми метеорологическими условиями года. Это можно видеть на примере водного режима почв Оренбургской степи (Заволжье), частично представленного данными табл. 78 [134].

Как видно из данных табл. 78, устойчивое влияние лесных полос проявляется на расстоянии 100—125 м от их опушек (двадцатикратная высота полос). В 150 м от опушек (около тридцатикратной высоты полос) влажность почвы примерно такая же, как в середине межполосного поля. Наибольшее увеличение запасов влаги в почве за период весеннего снеготаяния (на 100 мм и более) наблюдается на ближайших к лесополосам участках, где имеются и наибольшие запасы воды в снеге. Наименьшие прибавки влаги в почве (36—60 мм) отмечают в середине межполосного поля, где малы и запасы воды в снеге.

Абсолютная величина изменений запасов влаги в почве за период снеготаяния тем больше, чем суше почва с осени. Это подтверждает и сравнение данных 1951-52 г. с данными 1950-51 г. То же самое следует отметить и в отношении использования талых вод: в 1951-52 г. оно было в среднем для поля в два раза больше, чем в 1950-51 г.

Зависимость величины изменений запасов влаги за зимне-весенний период от осеннего увлажнения почвы и запасов воды в снеге ко времени снеготаяния на межполосных полях может быть выражена уравнением

$$\Delta W = -0,74 W + 0,24 M + 74. \quad (95)$$

В этом уравнении  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы за период от установления отрицательных температур воздуха осенью до перехода среднесуточных температур через 5° С весной (мм),  $W$  — запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы осенью ко времени установления отрицательных

Таблица 78

Запасы продуктивной влаги в межполосном поле и пополнение их талыми водами  
Оренбургская степь, 1950-51 и 1951-52 гг.

Место наблюдений	1950-51 г.					1951-52 г.				
	запасы воды в снежном покрове (мм)	запасы влаги (мм) в слое почвы 0—100 см			использование талых вод (%)	запасы воды в снежном покрове (мм)	запасы влаги (мм) в слое почвы 0—100 см			использование талых вод (%)
		осенью	весной	прибавка			осенью	весной	прибавка	
Лесная полоса . . . . .	580	39	62	23	4	755	4	182	178	24
Межполосное поле от заветренной опу- шки (м)										
15	234	68	121	53	23	188	17	148	131	70
50	168	63	110	47	28	135	22	127	105	78
100	74	56	118	62	86	103	24	100	76	74
150	78	49	91	42	54	105	16	92	76	72
середина поля										
450	122	40	76	36	30	105	14	74	60	57
от наветренной опу- шки (м)										
150	120	32	84	52	43	86	8	60	52	60
100	136	44	100	56	41	85	10	108	98	115
50	144	60	121	61	42	95	15	139	124	130
15	440	64	94	30	7	448	16	170	154	34
Лесная полоса . . . . .	410	84	114	30	7	604	10	182	172	29
Среднее взвешенное для всего межполосного поля . . . . .	134	55	97	42	31	117	15	95	80	68

температур (мм),  $M$  — запасы воды в снеге ко времени снеготаяния плюс осадки за период снеготаяния (мм).

Из представленных в табл. 78 данных видно также, что на некоторых участках поля использование талых вод больше 100%, т. е. больше запасов воды в снеге в данном пункте. Это вызвано стеканием воды с тающих вблизи лесных полос сугробов снега, под которыми обычно имеется ледяная корка, не пропускающая воду, вследствие чего вода стекает к краям сугроба, а иногда в глубь поля, где поглощается талой уже к этому времени почвой. В результате указанного явления почва, лежащая под высокой частью сугробов, получает далеко не всю ту воду, которая была в имеющемся здесь снеге, а соседние участки поля, впитывая приток талых вод, увеличивают запасы влаги в почве больше, чем имелось здесь воды в снеге.

Увеличение запасов продуктивной влаги метрового слоя почвы в зоне действия лесных полос по сравнению с серединой поля к началу вегетационного периода в среднем составляет 40—50 мм.

По сравнению с открытой степью эти различия больше (60—70 мм), так как середина междолосного поля даже при большой его ширине не может быть приравнена к открытой степи ни по запасам влаги в снежном покрове, ни по характеру их просачивания в почву. Запасы воды в снежном покрове в открытой степи в оба года (1951-52 и 1950-51) были на 40—50 мм меньше, чем в середине междолосного поля; поглощение талых вод — слабее.

По исследованиям Тимашевского опорного лесомелиоративного пункта (Поволжье), средний за 5 лет весенний запас влаги в двухметровом слое почвы под защитой лесных полос оказался на 100—120 мм (в зависимости от расстояния) больше, чем на незащищенных полях [51]. По наблюдениям в Каменной Степи (лесостепные

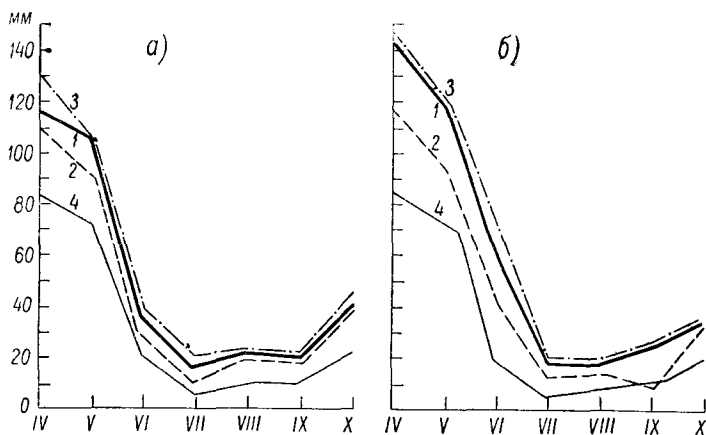


Рис. 44. Запасы продуктивной влаги (мм) метрового слоя почвы под яровой пшеницей на различных расстояниях от лесополос (средние за 3 года).

а — наветренная сторона, б — наветренная сторона; 1 — на расстоянии 50 м, 2 — на расстоянии 100 м, 3 — на расстоянии 15 м, 4 — в середине междолосного поля.

районы Центрально-Черноземной полосы), под влиянием системы лесных полос запасы влаги в почвах междолосных полей в некоторые годы превышали запасы влаги в открытой степи на 70—80 и даже 120 мм. В некоторые же годы в силу их метеорологических особенностей эффективность лесополос была значительно меньше [27].

С началом вегетации сельскохозяйственных культур и увеличения расходов воды на транспирацию различие во влагозапасах отдельных частей междолосного поля быстро сглаживается. Так, по исследованиям С. Б. Мастинской в Оренбургской степи, к концу июня только на ближайших к лесополосам участках, особенно у наветренных опушек, запасы продуктивной влаги под яровыми культурами (пшеницей) держатся еще на высоком уровне, составляя 50—70 мм при 10—20 мм в середине междолосного поля. К концу июля и эти различия сходят на нет (рис. 44). Соответ-

ственно затухают различия между запасами влаги в защищенном лесными полосами поле и в открытой степи. Еще быстрее идет расходование и выравнивание запасов почвенной влаги под многолетними травами. Уже к концу июня в метровом слое почвы их остается меньше 20 мм, а к концу июля они полностью расходуются.

Суммарное испарение влаги яровой пшеницей (испарение с поверхности почвы плюс транспирация) в начале вегетации (до выхода в трубку) в пределах всего междолосного поля более или менее одинаково, так как оно происходит преимущественно из пахотного слоя почвы, влажность которого в это время выравнена на всем поле. В дальнейшем (с выходом в трубку и до конца вегетации, особенно в период налива зерна) суммарное испарение на участках, прилегающих к опушкам, существенно больше, чем в середине междолосного поля, что определяется большими запасами влаги в почве. Связь между начальными запасами влаги в почве и суммарным испарением ее за период репродуктивного развития яровой пшеницы имеет явно выраженный закономерный характер (табл. 79). По трехлетним наблюдениям в междолосных полях Оренбургской степи, средняя за декаду величина суммарного испарения за весь период вегетации яровой пшеницы составляет в середине междолосного поля 18 мм, в зоне действия лесных полос на расстоянии 100 м от опушек—21 мм, 50 м—23 мм и 15 м—25 мм. Таким образом, чем ближе к лесным полосам и чем больше запасы влаги в почве, тем больше расходуется воды с поля в период вегетации растений. Причем наличие лесных полос обеспечивает не только большее количество расходуемой воды, но и создает условия для более продуктивного ее использования растениями.

Таблица 79

Среднее за декаду суммарное испарение влаги в различно увлажненных частях междолосного поля

Запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0—100 см к началу декады (мм)	0—30	30—60	60—90	90—120	120—150
Испарение за декаду (мм) . . . . .	14	20	29	34	39

По сравнению с открытой степью в междолосном поле доля расходов воды на транспирацию растений, т. е. на продуктивное испарение значительно больше, чем на испарение с поверхности почвы. Это происходит вследствие затенения почвы более мощно развитым в междолосном поле растительным покровом и снижения испаряемости.

Данные наблюдений в Каменной Степи показывают, что расход влаги на испарение с поверхности почвы в поле, занятом яровой пшеницей, под защитой лесных полос составляет 37 %, в открытой

степи — 52% (табл. 80, [26]). По наблюдениям Ростошевского опорного агролесомелиоративного пункта (правобережье Волги), непродуктивные расходы под защитой лесных полос и в степи соответственно составляют 30 и 45%, что обеспечивает более экономное использование почвенной влаги в межполосном поле по сравнению с открытой степью и в зоне действия лесных полос по сравнению с серединой поля (летний эффект полос).

Таблица 80

Расход влаги на транспирацию и испарение в поле с яровой пшеницей за период 16 V—11 VIII 1950 г.

Место наблюдений	Суммарное испарение (мм)	Испарение с поверхности почвы (мм)	Транспирация (мм)	Испарение с поверхности почвы (% суммарного)
В открытой степи . . .	173	89	84	52
В системе лесных полос	217	80	137	37

Сопоставление запасов продуктивной влаги с потребностью в ней сельскохозяйственных растений в основные отрезки периода их вегетации показало, что влагообеспеченность культур в различных частях межполосного поля различна. Так, в Оренбургской степи под яровой пшеницей в зоне действия лесных полос запасы влаги в метровом слое почвы были больше, чем в середине межполосного поля: в период посев—выход в трубку на 20—70 мм, в период трубка—цветение на 15—30 мм и в период цветение—восковая спелость на 2—20 мм (табл. 81). В пахотном же горизонте существенного различия в запасах влаги в пределах межполосного поля не наблюдалось, особенно в первую часть вегетационного периода.

В связи с отсутствием существенных различий во влажности пахотного слоя почвы в первый период вегетации (до выхода в трубку) состояние посевов в пределах всего межполосного поля было почти одинаковым: разница составляла всего 0,2—0,3 балла. В дальнейшем (после выхода в трубку), когда в водоснабжении решающую роль играют запасы влаги более глубоких слоев почвы, состояние яровой пшеницы в зоне действия лесных полос было лучше, чем в середине межполосного поля. В период цветения пшеницы разница оценок состояния (по пятибалльной системе) составляла около 1 балла (в среднем за 3 года), а ко времени наступления восковой спелости — почти 2 балла.

В соответствии с лучшими условиями влагообеспеченности урожай яровой пшеницы в зоне действия лесных полос в 1950 г. составлял 15—17 ц/га против 10 ц/га в середине межполосного поля; в 1951 г. урожай соответственно были 14—15 и 10 ц/га; в 1952 г. — 11 и 7 ц/га. В открытой степи урожай яровой пшеницы в 1951 г. не превышал 7—8 ц/га, а в 1952 г. — 5 ц/га.

Таблица 81

## Средние запасы продуктивной влаги метрового слоя почвы (мм) под яровой пшеницей в разные фазы периода вегетации

Расстояние от лесных полос (м)	1950 г.			1951 г.			1952 г.			В среднем за 1950—1952 гг.		
	посев — выход в трубку	выход в трубку — цветение	цветение — восковая спелость	посев — выход в трубку	выход в трубку — цветение	цветение — восковая спелость	посев — выход в трубку	выход в трубку — цветение	цветение — восковая спелость	посев — выход в трубку	выход в трубку — цветение	цветение — восковая спелость
В зоне действия лесополос												
От заветренной (южной) опушки												
15 . . . . .	102	74	41	121	87	23	131	82	34	118	81	33
50 . . . . .	99	60	20	119	95	29	119	81	27	112	79	25
100 . . . . .	88	56	27	126	—	17	80	39	18	98	48	21
Средние . . . . .	96	63	29	122	91	23	110	67	26	109	69	26
От наветренной (северной) опушки												
15 . . . . .	111	75	36	—	85	20	147	88	44	129	83	33
50 . . . . .	117	74	27	138	100	27	106	62	26	120	79	27
100 . . . . .	104	70	31	69	42	12	72	32	5	82	48	16
Средние . . . . .	111	73	31	104	76	20	108	61	25	110	70	25
В среднем в зоне действия лесных полос	104	68	30	113	84	22	109	64	26	110	70	26
В середине межполосного поля . . . . .	84	52	12	91	54	20	70	40	9	82	49	14
Разница запасов влаги (зона действия лесополос — середина межполосного поля)	20	16	18	22	30	2	39	24	17	27	21	12

Суммарные расходы влаги на образование единицы урожая зерна яровой пшеницы в зоне действия лесных полос в отдельные годы оказались на 10—20% меньше, чем в части поля, находящейся вне воздействия лесных полос, и на 30—35% меньше, чем в открытой степи. В среднем за 3 года расход воды на 1 ц зерна составил в зоне действия лесных полос 1480 ц, в середине межполосного поля 1800 ц и в степи 2280 ц.

Таким образом, в Оренбургской степи прибавки урожая яровой пшеницы в зоне действия лесных полос пятнадцати—восемнадцати-летнего возраста и высотой около 7 м по сравнению с серединой межполосного поля и открытой степью колебались в зависимости от метеорологических условий года в пределах 4—7 ц/га, эффективность использования влаги была на 20—30% выше [134].

Аналогичные данные получены также в степных районах Северного Казахстана и Западной Сибири, где зимний эффект лесополос благодаря длительной суровой зиме и метелевым ветрам весьма ярко выражен. Собранные материалы показывают, что в средние по увлажнению годы прибавки урожаев составляют около 80%, а в засушливые — 100—125% и лишь в годы с обильным выпадением осадков (что здесь бывает весьма редко) эффекта лесополос практически не наблюдается [140].

Во влажные годы взрослые лесные полосы непродуваемой конструкции оказывают иногда и отрицательное влияние на урожай сельскохозяйственных культур. Причина этого явления кроется в запоздалом сходе снежного покрова (см. рис. 43) и избыточном увлажнении почвы вблизи лесополос по сравнению с основным массивом межполосного поля, а также в запоздалом созревании здесь сельскохозяйственных растений. Недоучет этих моментов приводит иногда к значительному недобору урожаев в приопушенной части межполосного поля (до 3—5 и даже 7 ц/га). В связи с этим посев и уборку сельскохозяйственных культур на межполосных полях, защищенных непродуваемыми полосами, как уже ранее говорилось, рекомендуется производить в дифференцированных сроки.

Положительное влияние лесополос на урожайность сельскохозяйственных культур начинает проявляться еще в период, когда лесополосы находятся в молодом возрасте и имеют высоту 1,5—2,0 м. С ростом лесополос их влияние возрастает.

По данным обследования, на Украине прибавки урожая озимой пшеницы под воздействием молодых лесополос в засушливом 1954 г. составляли:

Высота полос (м) . . .	2,0	2,5	3,0—3,5	4,0
Прибавки урожаев (ц/га)	1,2	2,1	2,4	2,7

Увеличение урожая происходило за счет большей густоты стеблей, увеличения числа зерен в колосе и повышения абсолютного веса зерна.



Дальность действия лесополос на урожай зерновых культур распространялась примерно на расстояние, равное двадцати—тридцатикратной их высоте, затухая от опушек к центру межполосного поля [122]. При высоте молодых полос 2,5—3 м прибавки в урожае зерна на расстоянии двадцатикратной высоты их колебались в пределах 10—15%, а в среднем для всей зоны их действия (тридцатикратная высота) составляли около 10% урожая в открытом поле. У полос высотой более 3 м вблизи опушек прибавки были значительно больше, чем в отдалении от них, и в среднем для зоны действия полос составляли 20%. Эти данные получены при обследовании молодых лесополос на Украине, они отражают в основном их летнюю эффективность (табл. 82).

Таблица 82

**Влияние лесных полос на урожай зерна в межполосном поле в процентах урожая зерна в открытой степи**

Высота полос (м)	Расстояние от лесополосы (единица измерения — высота полосы)					В среднем в зоне действия лесополос	В откры- той степи
	2	5	10	20	30		
2,5—3,0	113	113	112	112	104	111	100
4,0—5,0	139	133	123	105	101	120	100
6,5—9,5	139	126	115	109	106	119	100

Когда же влияние лесополос проявляется и зимой в виде снеготложения и последующего за этим обильного увлажнения почвы талой водой, то эффективность его для урожайности и на Украине оказывается намного больше. Так, по результатам массового обследования, влияние полезащитных лесонасаждений на урожайность сельскохозяйственных культур в засушливом 1954 г. (обследовалось свыше 500 полос с определением урожайности на 34 тыс. гектаров), когда их влияние проявилось в образовании снежных отложений и увлажнения почвы, было значительным. Прибавки урожаев зерновых культур составляли от 25 до 100%, а в отдельных случаях даже 300—400% по сравнению с открытым полем. Особенно сильное влияние оказали полосы высотой 8—10 м и более, существовавшие до 1941 г. и сохранившиеся к 1954 г.

Роль полезащитного лесоразведения в повышении урожайности сельскохозяйственных культур еще усиливается за счет высокой эффективности удобрений в межполосных полях, защищаемых продуваемыми полосами.

По данным Института сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. Докучаева, повышение урожаев яровой пшеницы под влиянием внесения удобрений в открытой степи составило 0,5—1,3 ц/га, а среди лесных полос — 2,3—3,3 ц/га, сахарной свеклы соответственно 64—108 и 108—171 ц/га, а многолетних трав 4

и 30,5 ц/га. Такого же порядка величины повышения урожаев за счет применения минеральных удобрений под защитой лесных полос (ажурных) и вне их защиты получены на обыкновенных и южных черноземах Алтайского края [113].

Сопоставление данных о влиянии лесных полос на эффективность минеральных удобрений с данными о влиянии лесных полос на водный режим почвы приводят к заключению, что увеличение эффективности удобрений под влиянием лесных полос определяется влиянием лесополос на водный режим почв.

Само собой понятно, что снегонакопительная роль лесных полос, или, как говорят, зимний эффект лесных полос, наиболее ярко проявляется в районах с длительной суровой зимой и сильными метелевыми ветрами, т. е. в степных районах Поволжья, Сибири, Северного Казахстана. В районах с мягкими зимами и частыми оттепелями снегонакопительная роль полезащитных полос менее ощутима, а иногда и совсем отсутствует. К таким районам в нашей стране относится южная и западная часть Украины, Предкавказье и Приазовье.

По работам, проведенным в Польше, Дании, Чехословакии и Германии, в Центральной и Западной Европе, влияние полезащитного лесоразведения на влажность почвы проявляется в основном через снижение испарения в зоне действия лесных полос (летний эффект). В связи с мягким и влажным климатом увеличение влажности почвы за счет накопления снега (зимний эффект) здесь незначительно [328].

## *Глава XI*

### **ВОДНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ И ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ОРОШЕНИЯ**

Самым надежным приемом создания оптимальной влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в засушливых районах является орошение. Оно дает возможность полностью регулировать режим влажности почвы, в сочетании с высокой агротехникой почти нацело снимает вредное влияние засух, суховеев и обеспечивает получение высоких урожаев практически при любых условиях погоды.

Главная цель орошения — добиться полного удовлетворения потребности растений во влаге. Из этого как основного положения обычно исходят при планировании ирригационных мероприятий.

#### **Пределы увлажнения почвы при орошении**

Большинство исследователей считают, что наилучший рост растений обеспечивается в тех случаях, когда транспирация удерживается на максимальном для окружающих условий уровне, т. е. когда она близка к испаряемости, а максимальная эффективность использования воды достигается при отношении суммарного испарения к количеству поступающей воды, близком к единице [162, 96]. Исходя из этих представлений, за оптимум увлажнения (верхний предел) принимают наименьшую влагоемкость почвы, соответствующую влажности почвы, обеспечивающей практически неограниченную скорость подачи воды.

Связь урожаев зерновых культур с суммарными расходами влаги (водопотреблением) в засушливых районах СССР, при оптимальном удовлетворении растений всеми другими факторами, прямолинейна. Чем медленнее поступает вода в растение, т. е. чем суше почва, тем медленнее формируется урожай, тем ниже его уровень. Отсюда вытекает тот же вывод: оптимум увлажнения почвы находится где-то очень близко к ее наименьшей влагоемкости.

Сопоставление оценок состояния зерновых культур в период их роста с запасами продуктивной влаги в корнеобитаемом слое также подтверждает это положение: максимальные оценки наблюдаются при влажности почвы, близкой к наименьшей влагоемкости (см. табл. 44, 45, 46, глава VIII). Исключение составляет лишь период формирования зерна, когда оптимум увлажнения лежит су-

щественно ниже, соответствует влажности почвы, примерно равной 70% наименьшей влагоемкости, выраженной в миллиметрах продуктивной влаги. О том, что оптимум увлажнения в период роста лежит где-то очень близко к наименьшей влагоемкости почвы, говорят и обобщенные исследования А. А. Роде [192], а также результаты многочисленных полевых опытов по установлению оптимальных режимов орошения сельскохозяйственных культур.

Однако известно, что в процессе роста и развития растения по-разному реагируют на недостаток воды. Прирост в высоту более чувствителен к недостатку влаги, чем увеличение количества сухого вещества, а урожай семян, в частности зерна, нередко совсем не снижается от умеренного недостатка влаги в период налива зерна. Более того, продукция некоторых соединений (таких, как сахар, каучук, никотин и др.), а также некоторые хозяйственные качества зерна (например, степень подготовленности его к хранению) даже улучшается с понижением транспирации по соотношению с испаряемостью.

С хозяйственной точки зрения устойчивое поддержание влажности почвы на таком высоком уровне, как наименьшая влагоемкость, не всегда целесообразно, а практически даже и не всегда осуществимо. В случае постоянного поддержания влажности на уровне наименьшей влагоемкости необходимо глубокое промачи-

вание, что создает опасность выноса питательных веществ, в первую очередь азота, из корнеобитаемого слоя. Это хорошо иллюстрируется рис. 45, где представлено влияние режимов орошения на вымывание азота и урожай сахарной свеклы. В представленном на рис. 45 случае поливы проводились один раз в 2 недели. При поливной норме *С* воды было достаточно, чтобы влажность почвы повышалась до наименьшей влагоемкости на глубину всего корнеобитаемого слоя. При норме *В* воды подавалось в два раза, а при норме *А* — в три раза больше, чем при норме *С*. Как видно, при возрастании поливной нормы сверх наименьшей влагоемкости корнеобитаемого слоя азот вымывался, а урожай снижался [239].

На плохо дренируемых орошаемых землях излишек поливных вод приводит к их застою и, кроме снижения урожаев, вызывает засоление и заболачивание полей.

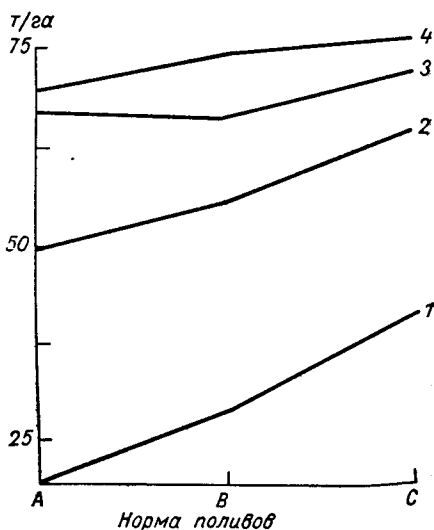


Рис. 45. Влияние поливной нормы на вымывание питательных веществ и урожай сахарной свеклы.

1 — без внесения азота, 2 — 120 кг азота на 1 га, 3 — 240 кг азота на 1 га, 4 — 360 кг азота на 1 га.

Минимальное содержание продуктивной влаги, которое можно допускать в ирригационном цикле при данных погодных условиях, не вызывая существенного дефицита воды в растении и снижения его урожая, зависит главным образом от градиентов свободной энергии почвенной влаги и коэффициентов влагопроводности в системе почва—растение—атмосфера. В настоящее время таким критическим значением считают влажность разрыва капилляров, которая, по исследованиям А. А. Роде, М. М. Абрамовой и др. для суглинистых почвенных разностей, принимается равной 70—80% (в среднем 75%) наименьшей влагоемкости, выраженной в процентах веса абсолютно сухой почвы, а по исследованиям агрогидрологов Гидрометслужбы для основных типов почв — равной 55% наименьшей влагоемкости, выраженной в миллиметрах продуктивной влаги (см. главу IV).

### **Агрометеорологические особенности произрастания сельскохозяйственных культур при орошении**

Основной особенностью климата районов орошения в Поволжье, на Северном Кавказе, юге Украины, в Молдавии и Западном Казахстане, кроме общей недостаточности осадков, является крайне неравномерное выпадение их по годам. Это обуславливает необходимость приспособления поливных режимов к метеорологическим условиям каждого года. В противном случае и при орошении трудно добиться получения из года в год устойчиво высоких урожаев и избежать засоления и заболачивания почв. Возникает необходимость систематического агрометеорологического обслуживания орошаемого земледелия.

Связи скорости расходования почвенной влаги и формирования урожая с метеорологическими факторами, установленные в богарных условиях и успешно используемые при агрометеорологическом обслуживании неполивного земледелия, в большинстве случаев не могут быть применены в этих целях в орошаемых хозяйствах. Условия произрастания и реакция орошаемых культур на метеорологические факторы сильно отличаются от неорошаемых. Они имеют свой агрометеорологический режим с целым рядом особенностей.

Орошение изменяет почти все факторы, влияющие на рост растений: микроклимат поля, биологические свойства растений (в частности, строение корневой системы, соотношение между вегетативными и репродуктивными органами), уровень грунтовых вод, почвенные условия (структуру, засоленность) и т. д.

Исследования микроклимата орошаемых полей в степной, сухостепной и полупустынной зонах СССР показали, что главный эффект орошения как фактора, формирующего фитоклимат, заключается в изменении режима температуры и влажности в среде обитания растений вследствие огромных затрат тепла на испарение [18, 240].

За счет изменения физических свойств деятельной поверхности (отражающей и излучающей способности), а также, возможно, и за счет краевого эффекта — адвекции тепла со смежных неорошаемых участков — на орошаемых полях радиационный баланс значительно увеличивается, что обеспечивает возможность дополнительного испарения. Преобладающая на орошаемом поле устойчивая стратификация температуры, инверсия и изотермия в приземном двухметровом слое воздуха и наблюдающийся в связи с этим ослабленный вертикальный обмен обуславливают накопление испарившейся влаги вблизи растений и резко уменьшают теплоотдачу деятельной поверхности в воздух. Поливы, высокая влажность почвы и мощно развитый растительный покров уменьшают суточные амплитуды теплового потока и температуры корнеобитаемого слоя почвы.

В итоге микроклимат орошаемых полей гораздо мягче неорошаемых. В жаркие суховейные дни, когда в неорошаемой пшенице дефициты влажности воздуха достигают 50—60 мб, температура воздуха поднимается до 38—40° С, температура поверхности почвы — до 50—60° С, в орошаемой пшенице показания всех этих элементов намного ниже: температуры воздуха на 6—8° С, поверхности почвы на 20—25° С и дефицита влажности воздуха — на 30—35 мб. В результате даже в самые засушливые годы пагубных для зерновых культур суховеев на орошаемых полях не наблюдается. Они трансформируются в слабые или умеренные, а чаще всего не образуются совсем [184]. Смягченный микроклимат и обильные запасы влаги в почве на орошаемых полях в результате поливов предохраняют посевы зерновых культур от суховеев даже в таких засушливых районах СССР, как Ташкент, где во время суховеев дефициты влажности воздуха на высоте 2 м в будке достигают 80—83 мб.

При рационально организованном орошении на протяжении всего периода вегетации обеспечивается оптимальное увлажнение почвы, а следовательно, бесперебойное питание растений и, кроме того, в несколько раз повышается эффективность использования удобрений. На темно-каштановых легкосуглинистых почвах Кулундинской степи, например, прибавка урожаев яровой пшеницы от внесения полного минерального удобрения в опытах Биологического института Сибирского отделения Академии Наук СССР и Новосибирского сельскохозяйственного института [20] при орошении составила 16,0 ц/га, в то время как без орошения — всего 1,9 ц/га.

О высокой эффективности удобрения зерновых культур при орошении говорят данные и других опытных учреждений. Так, по обобщению, выполненному Всесоюзным научно-исследовательским институтом удобрений и агропочвоведения [107], прибавка урожаев зерна кукурузы за счет внесения удобрений при орошении на юге Поволжья (район Астрахани) составляет 27,5 ц/га, без орошения 4,2 ц/га; на Северном Кавказе эти прибавки составляют соответственно 14,4 и 6,9 ц/га.

Для получения надлежащего эффекта поливы должны производиться с учетом изменений, вносимых орошением в условия произрастания сельскохозяйственных культур. Сроки и нормы полива должны устанавливаться с таким расчетом, чтобы, во-первых, не допускать снижения влажности почвы до пределов, нарушающих оптимальное соотношение процессов роста и развития растений; во-вторых, обеспечивать промачивание всего корнеобитаемого слоя в целях полного использования имеющихся в почве питательных веществ; в-третьих, не допускать просачивания воды из корнеобитаемого слоя почвы во избежание выноса питательных веществ, засоления и заболачивания орошаемых земель.

### **Режим влажности почвы и влагообеспеченность орошаемых зерновых культур по данным полевых опытов**

Для выявления закономерностей изменения запасов почвенной влаги при различных метеорологических условиях и установления степени благоприятствования различным запасам влаги орошаемым сельскохозяйственным культурам ЦИП были организованы исследования в засушливых районах Заволжья (ст. Бузулук, Оренбургская степь), Западной Сибири (ст. Ключи, Кулундинская степь) и Северного Кавказа (Ростовская областная опытная мелиоративная станция на территории Багаевско-Садковской оросительной системы).

В Бузулуке исследования проводились в содружестве и на базе Бузулукского сортоучастка, где поливы производились напуском по нормам и в сроки, принятые для сортоучастков. Для орошения использовались воды государственного водохранилища Елшанской ирригационной системы.

В Ключевском районе исследования проводились в комплексе и на базе опытов Биологического института Западно-Сибирского филиала АН СССР. Поливы проводились напуском на различных вариантах: при снижении запасов влаги в метровом слое почвы до 50 и до 70% НВ (общих запасов) и при нескольких вегетационных поливах. Для орошения использовались подземные воды, залегающие здесь на глубине около 15 м.

В Ростовской области исследования проводились в содружестве с Ростовской областной опытно-мелиоративной станцией на участках орошаемых: а) по бороздам при влажности почвы 70% НВ; б) по бороздам при влажности 80% НВ; в) дождеванием при 80% НВ; г) дождеванием в сочетании с бороздковыми поливами, также при влажности 80%. Во всех случаях расчет производился от общих запасов влаги. Оросительная вода поступала из Веселовского водохранилища.

В районе Бузулука почвы — обыкновенные среднесуглинистые черноземы, в Ключах — темно-каштановые супесчаные, в Ростовской области — предкавказские тяжелосуглинистые черноземы, разной степени выщелоченности. Почвы во всех случаях незасо-

ленные, вне влияния грунтовых вод, исключая отдельные поля Ростовской опытно-мелиоративной станции.

**Оренбургская степь.** Результаты исследований [33, 137] в Бузулукском районе Оренбургской области показали, что характерной особенностью орошаемых массивов является весьма различная глубина промачивания при поливах (20—150 см в пределах одного чека размером около 200 м<sup>2</sup>) и связанное с этим неравномерное распределение влажности почвы. Это обусловливается неровностью поверхности и различием расстояний отдельных участков чека от места впуска воды. Отмеченные различия в промачивании по территории обычно повторяются при каждом поливе и в какой-то степени сохраняются в течение всего вегетационного периода.

Наблюдения по тензиометрам показали, что в точках чека с достаточным количеством поливной воды среднесуглинистые почвы Бузулука по истечении 6 ч после напуска воды промачивались уже до глубины 100 см.

Влажность пахотного слоя этих почв на орошаемых и неорошаемых полях весной, до поливов, более или менее одинакова. Разница имеется лишь в глубоких слоях, где запасы влаги на орошаемых полях на 30—40 мм больше вследствие неполного использования поливных вод произрастающими в предшествующем году сельскохозяйственными культурами.

После поливов, естественно, наблюдаются большие различия в запасах как верхних, так и нижних слоев почвы орошаемых и неорошаемых массивов. В среднем за четырехлетний период наблюдений на орошаемых массивах в пахотном горизонте запасы продуктивной влаги удерживались в пределах 20—30 мм, в то время как на неорошаемых они большую часть репродуктивного периода не превышали 5 мм. В метровом слое на орошаемых полях запасы влаги, как правило, держались выше 100 мм и лишь к уборке

Таблица 83

Запасы продуктивной влаги (мм) на орошаемых (числитель) и неорошаемых (знаменатель) полях яровой пшеницы в среднем за 1952—1955 гг. в Оренбургской степи

Слой почвы (см)	IV		V			VI			VII		
	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0—20	$\frac{40}{30}$	$\frac{38}{50}$	$\frac{39}{32}$	$\frac{33}{29}$	$\frac{29}{19}$	$\frac{16}{8}$	$\frac{30}{4}$	$\frac{25}{2}$	$\frac{29}{1}$	$\frac{13}{0}$	$\frac{16}{6}$
0—50	$\frac{85}{64}$	$\frac{80}{62}$	$\frac{86}{69}$	$\frac{71}{65}$	$\frac{66}{50}$	$\frac{42}{25}$	$\frac{73}{13}$	$\frac{64}{8}$	$\frac{70}{4}$	$\frac{38}{2}$	$\frac{32}{10}$
0—100	$\frac{114}{76}$	$\frac{105}{70}$	$\frac{112}{86}$	$\frac{118}{102}$	$\frac{116}{79}$	$\frac{97}{51}$	$\frac{140}{31}$	$\frac{120}{13}$	$\frac{130}{10}$	$\frac{77}{6}$	$\frac{63}{14}$



уменьшались до 60—70 мм. На неорошаемых полях они держались на уровне 70—80 мм, а в репродуктивный период опускались даже ниже 10 мм (табл. 83). Особенно ярко различие в величине расходов влаги орошаемых и неорошаемых полей выявляется при анализе их по отдельным фазам вегетации сельскохозяйственных культур.

В период от посева до выхода в трубку яровой пшеницы в связи с достаточным увлажнением верхних слоев почвы за счет весеннего промачивания и отсутствием разницы в увлажнении (поскольку поливы в это время еще не производятся) скорость расходования почвенной влаги с орошаемых и неорошаемых массивов практически одинакова. На орошаемых полях среднесуточные расходы влаги составляют 3,0 мм, на неорошаемых — около 2,5 мм.

В период максимального накопления растительной массы (от выхода в трубку до цветения) в условиях орошения, где в это время производятся поливы, расходы сильно возрастают и в среднем составляют 6 мм/сутки. На неорошаемых же полях они равны 3 мм/сутки, т. е. в два раза меньше.

В дальнейшем на орошаемых участках скорость расходования влаги остается почти без изменений (5,5 мм/сутки). Только к концу вегетации (в период созревания зерна) она несколько снижается, до 5 мм/сутки. На неорошаемых же участках расходы влаги уже после цветения уменьшаются до 1,2 мм/сутки, а во время созревания зерна составляют всего 0,6 мм/сутки (табл. 84). Наибольшие величины расходования влаги из почвы наблюдаются непо-

Таблица 84

**Суммарные расходы влаги (мм/сутки) из метрового слоя почвы на орошаемых (числитель) и неорошаемых (знаменатель) полях в отдельные периоды развития яровой пшеницы в Оренбургской степи**

Год	Посев — выход в трубку	Выход в трубку — цветение	Цветение — молочная спелость	Молочная спелость — восковая спелость
1952	—	$\frac{7,2}{2,0}$	$\frac{6,4}{2,0}$	$\frac{4,7}{1,1}$
1953	$\frac{2,9}{2,7}$	$\frac{6,7}{3,7}$	$\frac{6,5}{2,4}$	$\frac{4,0}{1,0}$
1954	$\frac{2,7}{2,0}$	$\frac{4,7}{4,0}$	$\frac{4,5}{0,0}$	$\frac{6,2^*}{0,2}$
1955	$\frac{3,5^*}{0,7}$	$\frac{6,2}{2,7}$	$\frac{4,8}{0,5}$	$\frac{5,4}{0,2}$
Среднее . . .	$\frac{2,8}{2,4}$	$\frac{6,2}{3,1}$	$\frac{5,5}{1,2}$	$\frac{5,1}{0,6}$

Примечание. Звездочкой отмечен полив.

средственно после поливов и в период максимального роста растений. Под орошаемой яровой пшеницей в отдельные дни, по данным градиентных наблюдений, величина расходов достигает 13—14 мм/сутки, в то время как на неорошаемых в связи с крайне малыми запасами влаги в почве она в эти же дни не превышает 1—1,5 мм/сутки.

Такие большие расходы влаги при орошении объясняются в первую очередь высокой влажностью почвы и мощным развитием надземной массы растений, а также глубоким проникновением в почву хорошо развитой корневой системы, обуславливающей огромные расходы влаги на транспирацию. Смягчающее влияние фитоклимата орошаемого поля (более низкие температуры воздуха и почвы и меньшие дефициты влажности воздуха растительнообитаемого слоя) сказывается значительно меньше на расходовании почвенной влаги.

На орошаемых полях зависимость изменения запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы от метеорологических условий в период от выхода в трубку до восковой спелости выражается уравнением

$$\Delta W = -0,36t + 0,46m - 0,03W + 5,9, \quad (96)$$

где  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги метрового слоя почвы (мм/сутки),  $t$  — среднесуточная температура воздуха в психрометрической будке,  $m$  — количество осадков (мм/сутки),  $W$  — начальные запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм).

В период вегетации растений скорость расходования запасов продуктивной влаги из верхних слоев почвы (0—50 см) больше, чем из нижних (50—100 см). Это особенно характерно для дорепродуктивного периода развития посевов. Так, в фазу выхода в трубку яровая пшеница (в 1952 г.) расходовала 5,3 мм/сутки из верхнего и лишь 0,5 мм/сутки из нижнего полуметрового слоя. По мере развития и роста пшеницы различия в скорости расходования из отдельных слоев почвы постепенно затухают и доля участия нижних слоев почвы в снабжении растений водой все более и более возрастает. Это отмечалось во все годы исследований.

Влага на орошаемых полях в основном расходуется путем транспирации растений. В репродуктивный период при сомкнутом растительном покрове расходы влаги на испарение с поверхности почвы орошаемых полей составляют всего лишь около 15% суммарных расходов, на неорошаемых значительно больше, достигают 40%. Это является одной из причин более эффективного использования почвенной влаги орошаемыми культурами.

Наблюдения за развитием и ростом посевов показали, что на орошаемых полях во вторую половину вегетационного периода развитие пшеницы несколько задерживается по сравнению с неорошаемыми. В отдельные годы наступление фазы колошения запаздывает на 3 дня, наступление же фазы восковой спелости, как правило, запаздывает на 5—7 дней. Прирост пшеницы в высоту на

орошаемых массивах происходит значительно быстрее, чем на неорошаемых. Конечная высота орошаемой пшеницы в 1,5—1,8 раза больше неорошаемой.

Уравнение связи между суточными приростами посевов в высоту в период от выхода в трубку до прекращения роста пшеницы  $\Delta H$  со среднесуточной температурой воздуха  $t$  и исходными запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы  $W$  имеет вид

$$\Delta H = 0,11t + 0,017W - 1,6. \quad (97)$$

Учет элементов структуры урожаев и самих урожаев выявил, что в среднем за 4 года показатели всех элементов продуктивности на орошаемых полях были намного выше, чем на неорошаемых, особенно вес зерна с одного растения, который был выше в 3,2 раза. Средний урожай зерна яровой пшеницы составил на орошаемых полях 36,4 ц/га, на неорошаемых 10,4 ц/га, т. е. на орошаемых он был в 3,5 раза выше, чем на неорошаемых. Особенно большие различия в урожаях наблюдались в сухие годы. Так, в 1952 г. урожай пшеницы на орошаемых полях в семь раз превосходил урожай на неорошаемых (табл. 85).

Таблица 85

**Структура и урожай яровой пшеницы на орошаемых (числитель) и неорошаемых (знаменатель) полях в Оренбургской степи**

Элемент урожая	1952 г.	1953 г.	1954 г.	1955 г.	Среднее за 1952—1955 гг.	Отношение орошаемого к неорошаемому
Высота растений (см) . . . . .	$\frac{103}{36}$	$\frac{116}{77}$	$\frac{95}{55}$	$\frac{65}{39}$	$\frac{94}{52}$	1,8
Число колосоносных стеблей у одного растения . . . . .	$\frac{1,6}{1,0}$	$\frac{2,4}{1,1}$	$\frac{2,0}{1,4}$	$\frac{1,7}{1,2}$	$\frac{2,0}{1,2}$	1,8
Число колосков в колосе . . . . .	—	$\frac{16}{14}$	$\frac{14}{12}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{15}{11}$	1,4
Число зерен в колосе . . . . .	$\frac{21}{8}$	$\frac{33}{28}$	$\frac{24}{22}$	$\frac{30}{14}$	$\frac{27}{18}$	1,5
Вес зерна с одного растения (г) . . . . .	$\frac{1,0}{0,13}$	$\frac{1,80}{0,60}$	$\frac{1,25}{0,60}$	$\frac{0,26}{0,34}$	$\frac{1,33}{0,42}$	3,2
Вес 1000 зерен (г) . . . . .	$\frac{31,4}{15,1}$	$\frac{32,0}{25,6}$	$\frac{34,4}{20,0}$	$\frac{36,2}{23,3}$	$\frac{33,5}{21,0}$	1,6
Урожай зерна (ц/га) . . . . .	$\frac{31,0}{4,4}$	$\frac{44,0}{21,0}$	$\frac{34,0}{8,0}$	$\frac{36,6}{8,2}$	$\frac{36,4}{10,4}$	3,5

Эффективность использования влаги яровой пшеницей в условиях орошения значительно выше, чем без орошения. Суммарные

расходы влаги на единицу урожая зерна в среднем за 4 года на орошаемых полях почти в два раза меньше, чем на неорошаемых (табл. 86). Особенно сильно это проявляется в сухие годы.

Таблица 86

**Эффективность использования почвенной влаги орошаемой и неорошаемой яровой пшеницей в Оренбургской степи**

Год	Количество израсходованной за период вегетации воды (м³)				Соотношение расходов воды неорошаемой и орошаемой пшеницы на 1 ц урожая зерна
	на весь урожай зерна		на 1 ц урожая зерна		
	орошаемое поле	неорошаемое поле	орошаемое поле	неорошаемое поле	
1952	3830	1440	123,5	327,3	2,6
1953	3980	2450	90,5	116,7	1,3
1954	4260	2020	125,3	252,5	2,0
1955	4110	1160	112,3	141,5	1,3
Среднее	4045	1768	112,9	209,5	1,8

На эффективность использования влаги при орошении большое влияние оказывают условия погоды: в благоприятные по метеорологическим условиям годы (1953) расходы влаги на единицу урожая на 30—50% меньше, чем в сухие годы (1952).

**Кулундинская степь.** По исследованиям в Ключах, соотношение запасов влаги на орошаемых и неорошаемых полях в Кулундинской степи примерно такое же, что и в Оренбургской, но уровень запасов несколько ниже в связи с меньшей влагоемкостью почв вследствие более легкого механического состава их (табл. 87).

Таблица 87

**Запасы продуктивной влаги (мм) на орошаемых (числитель) и неорошаемых (знаменатель) полях яровой пшеницы в среднем за 1956—1957 гг. в Кулундинской степи**

Слой почвы (см)	VI			VII			VIII	
	1	2	3	1	2	3	1	2
0—20	26	22	21	21	20	17	10	15
	12	11	6	2	0	4	6	2
0—50	65	65	46	48	45	30	18	26
	31	25	13	4	2	7	8	2
0—100	133	100	90	84	84	52	33	44
	54	46	30	16	7	9	12	7

Характер расходования почвенной влаги на орошаемых полях в Кулундинской степи практически был таким же, как и на орошаемых полях Оренбургской степи. В период наиболее интенсив-

ного роста растений (выход в трубку—цветение) на орошаемых полях расходы влаги из метрового слоя почвы в отдельные годы составляли 5,0—8,2 мм/сутки, а в отдельные дни достигали 10 мм/сутки. На неорошаемых же полях они в этот период соответственно были 1,8—4,0 мм/сутки, т. е. меньше половины расходов влаги с орошаемого поля (табл. 88). В дальнейшем, как и в Бузулуке, различия в расходах влаги орошаемых и неорошаемых полей стали еще больше.

Таблица 88

Суммарные расходы влаги (мм/сутки) из метрового слоя почвы на орошаемых (числитель) и неорошаемых (знаменатель) полях в отдельные периоды развития яровой пшеницы в Кулундинской степи

Год	Посев — выход в трубку	Выход в трубку — цветение	Цветение — молочная спелость	Молочная спелость — восковая спелость
1956	—	$\frac{8,2}{4,0}$	$\frac{5,0}{1,7}$	$\frac{2,6}{0,7}$
1957	$\frac{3,2}{1,4}$	$\frac{5,0}{1,8}$	$\frac{5,4}{1,3}$	$\frac{4,2}{1,9}$
Среднее	—	$\frac{6,6}{2,9}$	$\frac{5,2}{1,5}$	$\frac{3,4}{1,3}$

Зависимость изменения запасов продуктивной влаги метрового слоя почвы на орошаемых полях от метеорологических условий в Кулундинской степи выражается уравнением

$$\Delta W = -0,26t + 0,60m - 0,046W + 4,0, \quad (98)$$

$$r = 0,76 \pm 0,04.$$

В этом уравнении  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм/сутки),  $t$  — среднесуточная температура воздуха,  $m$  — осадки (мм/сутки),  $W$  — исходные запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм).

Расчеты изменения запасов влаги по уравнениям (96) и (97) дали близкие величины, кроме случаев с высокими исходными запасами влаги. В этих случаях изменение запасов на легких почвах Кулундинской степи происходит быстрее, чем на среднесуглинистых почвах Оренбургской степи.

Расходы влаги на испарение с поверхности почвы на орошаемых полях в Кулундинской степи в среднем составляют 20% суммарных расходов, на неорошаемых — 49%, т. е. и здесь при орошении использование влаги яровой пшеницей было более продуктивно, чем без орошения.

Различия в условиях водоснабжения создали сильную неоднородность в состоянии орошаемых и неорошаемых посевов и обусловили большую разницу в урожаях. На орошаемых массивах

пшеница была значительно выше, имела большее количество вторичных корней, колосков и зерен в колосе и характеризовалась значительно большим абсолютным весом зерна (табл. 89). В связи с худшими условиями водоснабжения период налива зерна на неорошаемых полях был укорочен и прирост зерна сильно замедлен (рис. 46).

Урожай зерна яровой пшеницы на орошаемых полях были устойчиво выше, чем на неорошаемых. На неорошаемых в зависимости от метеорологических условий года они колебались от 5,6 до 9,2 ц/га, на орошаемых в зависимости от метеорологических условий и схем поливов — от 22,0 до 33,9 ц/га (табл. 89).

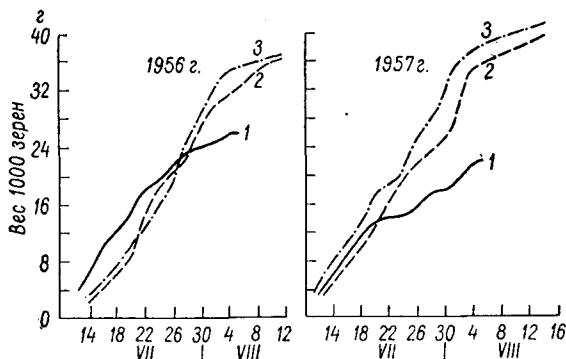


Рис. 46. Динамика прироста веса зерна яровой пшеницы на орошаемых и неорошаемых полях (Ключи Алтайского края).

1 — неорошаемое поле, 2 — полив при 50% НВ, 3 — полив при 70% НВ.

Количественное выражение степени благоприятствования создаваемых орошением условий водоснабжения формированию отдельных элементов продуктивности яровой пшеницы на темно-каштановых супесчаных почвах Кулундинской степи выразилось следующими уравнениями регрессии:

$$z_1 = 0,148Q_1 - 0,02, \quad (99)$$

$$r = 0,93 \pm 0,02, \quad E_{50} = \pm 0,09, \\ H = 0,30Q_2 + 28,5, \quad (100)$$

$$r = 0,95 \pm 0,02, \quad E_{50} = \pm 4,7, \\ z_2 = 0,16Q_3 - 0,27t + 11,4, \quad (101)$$

$$r = 0,91 \pm 0,03, \quad E_{50} = \pm 0,7, \\ z_3 = 0,02Q_4 + 0,16H + 5,9, \quad (102)$$

$$r = 0,96 \pm 0,02, \quad E_{50} = \pm 1,1, \\ P = 0,06Q_5 + 24,7, \quad (103)$$

$$r = 0,78 \pm 0,07, \quad E_{50} = \pm 2,0.$$

Структура и урожай зерна яровой пшеницы на орошаемых и неорошаемых полях  
Кулундинской степи (сорт Альбидум 3700)

Поле	Высота растений (см)	Количество озеренных стеблей на 1 м <sup>2</sup>	Количество колосков в колосе главного стебля	Количество озеренных колосков в колосе главного стебля (%)	Количество зерен в колосе главного стебля	Вес 1000 зерен (г)	Урожай (ц/га)
1956 г.							
Неорошаемое . . . . .	72	281	17	30	18	25,2	9,2
Полив при 50% НВ . . . . .	97	482	17	18	28	34,1	33,9
Полив при 70% НВ . . . . .	101	512	17	18	29	32,8	33,8
1957 г.							
Неорошаемое . . . . .	37	211	11	27	13	27,1	5,6
Полив при 50% НВ . . . . .	54	482	14	22	15	35,1	22,0
Полив при 70% НВ . . . . .	63	561	12	20	18	38,6	28,4
Четыре вегетационных полива	74	500	14	17	25	38,0	32,1

В этих уравнениях  $z_1$  — число вторичных корней,  $H$  — высота растений (см),  $z_2$  — число колосков в колосе,  $z_3$  — число зерен в колосе,  $P$  — абсолютный вес зерна (г),  $Q_1$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—20 см за период выход в трубку—колошение (мм),  $Q_2$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—100 см за период выход в трубку—колошение (мм),  $Q_3$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—20 см за период посев—выход в трубку (мм),  $Q_4$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—100 см за период колошение—молочная спелость (мм),  $Q_5$  — суммарные расходы влаги из слоя почвы 0—100 см за период колошение—восковая спелость (мм),  $t$  — среднесуточная температура воздуха за декаду, предшествующую выходу в трубку.

Как видно из приведенных уравнений, связи между условиями водоснабжения и показателями состояния орошаемой пшеницы (количеством вторичных корней, высотой растений), а также и основными элементами ее продуктивности (количеством колосков и зерен в колосе, абсолютным весом зерна) оказались очень высокими: коэффициенты корреляции больше 0,9. Несколько меньшим оказался лишь коэффициент корреляции между абсолютным весом зерна и условиями водоснабжения в период его налива (0,78).

Зависимость урожая зерна орошаемой яровой пшеницы от суммарных расходов влаги за весь период ее вегетации выразилась уравнением

$$R = 0,09Q - 6,8, \quad (104)$$

$$r = 0,94 \pm 0,01, \quad E_{50} = \pm 2,3,$$

где  $R$  — урожай зерна (ц/га),  $Q$  — суммарные расходы влаги за весь период вегетации (мм).

В данном уравнении связь между суммарными расходами влаги и урожаями орошаемой пшеницы оказалась более тесной, чем в аналогичном уравнении, полученном для неорошаемой пшеницы, абсолютное же значение ошибки этого уравнения несколько больше. Однако поскольку сами урожаи в поливных условиях намного выше, то относительная ошибка (в процентах среднего урожая) этого уравнения меньше, чем уравнения для неполивных условий.

Выявленные закономерности изменений запасов продуктивной влаги на орошаемых полях и установленные количественные связи формирования основных элементов продуктивности и урожая орошаемой яровой пшеницы от условий водоснабжения дают возможность на основе количественных расчетов регулировать ее водоснабжение на протяжении всего периода вегетации.

В настоящее время в связи с укреплением кормовой базы животноводства в засушливых районах большие площади орошаемых полей отводятся под кукурузу для возделывания ее как на силос, так и на зерно. Опыт по орошению кукурузы пока мал, особенно в новых районах ее возделывания.

Для изучения особенностей водного режима почв и влагообеспеченности кукурузы в условиях орошения ЦИП [143] в 1956, 1957 гг. совместно с Биологическим институтом Западно-Сибирского филиала Академии Наук СССР [246, 247] проводились исследования в Кулундинской степи; сорт кукурузы — среднеспелый Днепрпетровский.

В связи с обильным выпадением осадков в 1956 г. в первую часть вегетационного периода (посев—выход в трубку) запасы продуктивной влаги повсеместно были достаточными. В пахотном слое на неорошаемых полях они колебались сколо 15—20 мм, на орошаемых — около 15—30 мм и в метровом соответственно составляли 65—85 и 65—130 мм. В последующую часть вегетационного периода на неорошаемых полях влажность почвы катастрофически снизилась: к фазе выметывания до 33 мм в метровом слое, а к фазе появления нитей початка продуктивной влаги в почве практически не было совсем. На орошаемом массиве запасы влаги в это время поддерживались на уровне 50—100 мм.

В 1957 г. запасы влаги к посеву на всех полях были очень малы, меньше 35 мм в метровом слое. На полях без орошения ко времени выхода в трубку они уменьшились до 14 мм, а с первых чисел июня были меньше 10 мм. Поля, политые в фазу выметывания, после полива вплоть до конца вегетации имели в метровом слое почвы 85—50 мм воды. На полях с орошением при 50% НВ в большую часть вегетационного периода запасы влаги держались выше 60 мм и лишь накануне поливов и в период созревания зерна были около 30—40 мм. На полях же с орошением при 70% НВ влажность почвы никогда не опускалась ниже 45 мм (табл. 90). Следует при этом отметить, что со времени выметывания султана в водном балансе почв в 1957 г. большой удельный



Запасы продуктивной влаги (мм) под кукурузой на орошаемых и неорошаемых полях в Кулундинской степи

Год	Поле	V		VI			VII			VIII			IX	
		2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2

В слое почвы 0—20 см														
1956	Неорошаемое	15	19	20	21	16	8	2	2	1	6	4	2	2
	Полив при 50% НВ (7 VI, 4 VII, 28 VII, 18 VIII) . . .	15	19	30	20	14	14	9	27	12	18	14	12	12
	Неорошаемое	20	14	14	9	8	1	2	14	5	5	1	—	—
1957	Полив в фазу выметывания (14 VII) . . .	—	15	—	—	9	—	—	16	24	18	7	—	—
	Полив при 50% НВ (2 VI, 4 VII, 30 VII) . . .	15	14	19	14	13	19	7	34	12	11	7	7	7
	Полив при 70% НВ (29 V, 21 VI, 14 VII, 30 VII) . . .	17	26	18	28	18	4	18	24	12	31	16	14	14
	Неорошаемое	15	19	20	21	16	8	2	2	1	6	4	2	2

В слое почвы 0—100 см														
1956	Неорошаемое	65	75	74	86	75	51	33	18	14	3	8	6	4
	Полив при 50% НВ . . .	65	75	130	75	57	70	52	100	54	88	49	62	50
1957	Неорошаемое	32	22	27	14	14	6	6	18	6	30	8	3	—
	Полив в фазу выметывания	—	22	—	—	21	—	—	70	61	34	54	34	—
	Полив при 50% НВ . . .	22	19	64	60	47	102	52	116	74	74	42	33	38
	Полив при 70% НВ . . .	26	90	68	119	86	46	82	88	54	65	106	77	70

вес имели осадки, выпавшие в наиболее ответственный период роста кукурузы, причем количество их в три раза превышало норму.

Расходование почвенной влаги под орошаемой кукурузой в годы исследований отличалось теми же особенностями, которые характерны и для орошаемой яровой пшеницы. Расходы влаги на орошаемых полях были значительно больше, чем на неорошаемых, особенно в дни после поливов (до 6 мм/сутки). Максимальными расходами характеризовался период интенсивного роста растений (выход в трубку—выметывание султана). В это время в среднем за период на орошаемых участках расходы составляли 2,9—4,5 мм/сутки (табл. 91). На неорошаемых же участках они не превышали 0,9—2,2 мм/сутки. Следует отметить, что в период после выхода в трубку влага интенсивно расходовалась не только из верхнего слоя 0—50 см, но из всего метрового слоя.

Таблица 91

Средние расходы влаги из метрового слоя почвы (мм/сутки) в отдельные межфазные периоды развития кукурузы на орошаемых и неорошаемых полях Кулундинской степи

Период	1956 г.		1957 г.			
	неорошаемое поле	полив при 50% НВ	неорошаемое поле	полив		
				в фазу выметывания султана	при 50% НВ	при 70% НВ
Посев — выход в трубку . . .	2,2	3,3	1,7	1,7	2,2	3,0
Выход в трубку — выметывание султана . . . . .	2,2	4,5	0,9	0,9	2,9	4,5
Выметывание султана — цветение . . . . .	2,0	1,8	2,2	3,5	4,5	4,8
Цветение — восковая спелость	1,0	3,1	1,4	2,1	3,0	3,9

Зависимость изменений запасов почвенной влаги под орошаемой кукурузой от исходных ее запасов и метеорологических факторов выразилась уравнением вида

$$\Delta W = at + bm + cW + l, \quad (105)$$

где  $\Delta W$  — изменение запасов продуктивной влаги (мм/сутки),  $t$  — среднесуточная температура воздуха,  $m$  — количество осадков (мм/сутки),  $W$  — начальные запасы продуктивной влаги в почве (мм). Значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $l$  даны в табл. 92.

Непроизводительные расходы влаги на испарение с поверхности почвы под кукурузой в среднем за сутки мало отличались от расходов под яровой пшеницей. За вегетационный период в 1956 г. они составляли на неорошаемых участках 1,1 мм/сутки, а на участках с поливами при 50 и 70% НВ — 1,3—1,4 мм/сутки; в 1957 г. соответственно 1,3 и 1,7 мм/сутки. В сумме же за весь период вегетации кукурузы вследствие большей длительности периода расходы

Значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $l$  в уравнении  $\Delta W = at + bt + cW + l$  для орошаемой кукурузы Кулундинской степи

Период	Слой почвы (см)	$a$	$b$	$c$	$l$
Посев — выход в трубку . . . . .	0—20	—0,06	+0,18	—0,053	+1,5
	0—50	—0,07	+0,92	—0,055	+1,4
	0—100	—0,14	+0,48	—0,038	+3,0
Выход в трубку — цветение	0—50	—0,02	+0,33	—0,060	+4,2
	0—100	—0,21	+0,41	—0,060	+5,7
Цветение — молочная спелость	0—50	—0,12	+0,35	—0,046	+2,5
	0—100	—0,02	+0,26	—0,036	+0,4

влаги на поверхностное испарение под кукурузой были в 1,5—2 раза больше, чем под пшеницей, и составляли на участках неорошаемых 140—155 мм и на орошаемых 160—200 мм. Как видим, абсолютные величины непроизводительных расходов на орошаемых участках выше, чем на неорошаемых, однако соотношение их с суммарными расходами показывает, что при орошении доля производительных расходов (на транспирацию) больше, чем без орошения. В целом за период вегетации расходы на поверхностное испарение составляли на неорошаемых участках 70—80% суммарных расходов, а на орошаемых — 40—55% (табл. 93).

Таблица 93

Испарение с поверхности почвы под посевами кукурузы на орошаемых и неорошаемых полях (Кулундинской степи) в процентах суммарных расходов

Поле	Посев — выход в трубку	Выход в трубку — выметывание султана	Выметывание султана — цветение	Цветение — восковая спелость	За весь период вегетации
1956 г.					
Неорошаемое . . . . .	84	34	54	95	68
Полив при 50% НВ . . . . .	—	21	48	48	38
1957 г.					
Неорошаемое . . . . .	90	86	65	78	82
Полив при 50% НВ . . . . .	86	65	41	47	55
Полив при 70% НВ . . . . .	84	46	33	59	55

Создаваемые поливами различия в условиях водоснабжения сильно отразились как на темпах развития, так и на росте кукурузы. На участках с меньшими влагозапасами наступление фаз

развития растений задерживалось. В 1956 г. задержка наблюдалась начиная с фазы появления нитей початков, в это время она составляла 6 дней. Фаза молочной спелости на неорошаемых участках запоздала уже на 11 дней. В 1957 г. запоздание в темпах развития кукурузы на участках с худшими условиями водоснабжения началось раньше и проявилось более сильно. Вначале задержка составляла 2—4 дня (появление 11—12-го листа), фаза выметывания султана на участках с поливами при 50 и 70% НВ наступила на 14—18 дней раньше, чем на неорошаемых, а на участках, политых за неделю до выметывания, — на 8 дней раньше. Максимальные различия наблюдались ко времени появления 16-го листа, на неорошаемых участках он появился на 22—23 дня позже, чем на участках с орошением при 50 и 70% НВ.

С выпадением обильных осадков и улучшением условий водоснабжения кукурузы на неорошаемых участках в 1957 г. разница уменьшилась сначала до 10, а затем до 7 дней, но все же полностью не исчезла. В результате удлинения межфазных периодов сумма температур за эти периоды на участках с плохими условиями увлажнения значительно повышалась. Так, за период выход в трубку—выметывание султана в 1956 г. на неорошаемых участках сумма температур составила 575°С, а на участках, орошаемых при 50% НВ, 532°С; в 1957 г. за этот же период сумма температур соответственно составляла 849 и 510°С, т. е. на неорошаемых участках она была на 339°С больше. Между появлением 11-го и 16-го листьев в 1957 г. сумма температур составляла на неорошаемых участках 772°С, на орошаемых 295°С, т. е. разница достигала 477°С.

Материалы наблюдений выявили, что в начальный период развития (всходы—выход в трубку) прирост растений в высоту идет слабо, не превышает 1,0—1,5 см/сутки. При этом в 1957 г. прирост (по данным измерения до конца верхнего листа) был интенсивнее, чем в 1956 г., очевидно, в связи с более высокой температурой в первой и второй декадах июня (на 3—7°С). Но уже и в этот период улучшение условий водоснабжения на орошаемых участках оказывало благоприятное действие: после поливов прирост несколько увеличивался.

В период выход в трубку—выметывание султана наблюдалось резкое увеличение интенсивности линейного прироста на орошаемых полях, а в 1956 г., характеризующемся обильным выпадением осадков, и на неорошаемых. На поливных полях при наличии достаточных запасов почвенной влаги интенсивный линейный прирост в оба года продолжался до появления нитей початка, затем наблюдалось некоторое снижение интенсивности, а через 5—6 дней после появления нитей рост кукурузы прекращался.

При плохих условиях водоснабжения на неорошаемых полях в 1956 г. линейный прирост практически прекратился в фазу цветения, а в 1957 г. в связи с выпадением обильных осадков во вторую часть вегетационного периода он, как и на поливных участках, продолжался до появления нитей початка.

Характерно отметить, что на полях с поливом за неделю до фазы массового выметывания султана (14 VII) перед поливом прирост составлял меньше 1 см/сутки, после полива он увеличился до 3,0—3,5 см/сутки и продолжался с большой интенсивностью до конца этого периода. За период цветение—появление нитей початка в среднем прирост составил 3,7 см/сутки.

В соответствии с различной интенсивностью прироста, обусловленной водоснабжением, имелись существенные различия и в высоте растений. В 1956 г. вследствие обильного выпадения осадков

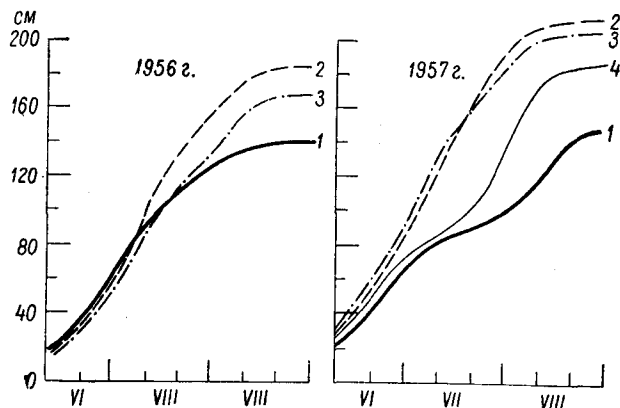


Рис. 47. Динамика роста кукурузы на орошаемых и не-орошаемых полях (Ключи Алтайского края).

1 — неорошаемое поле, 2 — полив при 50% НВ, 3 — полив при 70% НВ, 4 — полив в фазу выметывания султана.

в первый период различия в высоте роста кукурузы начали проявляться лишь в фазе выметывания султана (в связи с большими влагозапасами на полях с поливом при 50% НВ кукуруза здесь к концу 2-й декады июля была на 20 см выше по сравнению с другими полями). Ко времени прекращения интенсивного роста на участках, орошаемых при 50 и 70% НВ, она была на 25—40 см выше, чем на неорошаемых (рис. 47).

В 1957 г. различия в высоте растений проявились значительно раньше и были существенно больше. Уже ко 2-й декаде июня растения на поливных участках оказались на 8—10 см выше, в 1-й декаде июля разница возросла до 40—45 см, а в 3-й (выметывание султана) она достигла 80—90 см. На поле с одним поливом в фазу выметывания этот полив оказался весьма эффективным: растения начали быстро прибывать в высоту и в первую декаду августа (образование нитей початков) оказались на 60 см выше, чем на неорошаемом поле, и лишь на 30 см ниже, чем на участках с поливами при 50 и 70% НВ.

Количество воды, использованное кукурузой за весь период вегетации, на орошаемых полях с поливом при 50 и 70% НВ в оба года исследований было примерно в два раза больше, чем на неоро-

шаемых. Характерно при этом то обстоятельство, что в 1956 г. суммарные расходы за первую половину вегетационного периода (посев—выметывание султана) были в 1,5—2 раза больше, чем в 1957 г., а за вторую половину вегетации (выметывание султана—уборка), наоборот, в 1,5—2 раза меньше, чем в 1957 г. (табл. 94.).

Таблица 94

Суммарные расходы влаги ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) в период вегетации кукурузы на орошаемых и неорошаемых полях Кулундинской степи

Поле	До уборки на силос			До уборки на зерно		
	посев — выметывание султана	выметывание султана — уборка	весь период вегетации	посев — выметывание султана	выметывание султана — уборка	весь период вегетации
<b>1956 г.</b>						
Неорошаемое . . . . .	1650	440	2090	1650	490	2140
Полив при 50% НВ . . . . .	3020	1280	4300	3020	1310	4330
<b>1957 г.</b>						
Неорошаемое . . . . .	1000	900	1900	1000	910	1910
Полив						
в фазу выметывания . . . . .	830	1400	2230	830	1490	2320
при 50% НВ . . . . .	1190	2270	3460	1190	2220	3410
при 70% НВ . . . . .	1450	2180	3630	1450	2250	3700

В связи с различием в условиях водоснабжения и в количестве использованной воды состояние и урожай кукурузы на орошаемых и неорошаемых полях были резко отличны. При уборке на силос кукуруза, произраставшая при плохих условиях водоснабжения (неорошаемые поля), имела початки, дошедшие до молочной спелости, всего лишь у 30% растений, в то время как на хорошо орошаемых полях (полив при 50 и 70% НВ) к этому времени фаза молочной и восковой спелости наблюдалась уже у 80—100% растений (табл. 95, 1957 г.). Вес одного растения на орошаемых полях в оба года был в 1,5—2 раза больше, чем на неорошаемых. Примерно такое же соотношение имелось и в урожаях зеленой массы кукурузы.

Большие различия наблюдались и в урожаях зерна. В 1956 г. на неполивных участках он был около 10 ц/га, на поливных — 25—28 ц/га. В 1957 г. урожай составили на неорошаемых участках 25 ц/га, при поливах — 50—60 ц/га (табл. 95).

Из приведенных данных следует, что урожай как зеленой массы, так и зерна кукурузы в 1957 г. были намного выше, чем в 1956 г., несмотря на то что суммарные расходы влаги за период вегетации были значительно больше в 1956 г. Это обуславливалось указанным

Структура и урожай кукурузы (сорт Днепротетровская) на орошаемых и неорошаемых полях Кулундинской степи

Поле	Высота растений до конца верхнего листа (см)	Количество початков на одно растение		При уборке на силос				При уборке на зерно					Урожай зерна (ц/га)
				число растений (%) в фазе				Урожай зеленой массы (ц/га)	вес озёрненного початка (г)	число зерен в початке	вес 1000 зерен (г)	вес зерна в початке (г)	
		озёрненных	неозёрненных	появления линей почат- ков	молодой спелости	вскоковой спелости							
1956 г.													
Чёрошаемое . . . . .	135	0,8	0,2	20	55	25	248	150	70	190	119	22	9,5
Полив при 50% НВ . . . . .	177	0,9	0,1	10	20	70	449	315	94	246	160	39	27,6
1957 г.													
Неорошаемое . . . . .	141	1,1	0,6	70	30	0	480	288	107	332	125	42	24,9
Полив													
в фазу выметывания сул- тана . . . . .	177	1,3	0,3	15	80	5	651	390	168	407	180	73	50,2
при 50% НВ . . . . .	197	1,2	0,3	0	70	30	850	510	211	468	219	103	58,5
при 70% НВ . . . . .	195	1,2	0,2	5	50	45	790	494	199	414	219	90	59,5

ранее распределением суммарных расходов по основным фазам вегетационного периода. Отсюда можно сделать заключение, что решающее значение для формирования урожая кукурузы имеют хорошие условия водоснабжения во вторую часть периода вегетации.

Эффективность использования влаги в 1957 г. также была выше. Количество воды, израсходованное на 1 ц зеленой массы в 1957 г., было примерно в два раза меньше, чем в 1956 г., а на 1 ц зерна — в 2,5—3 раза меньше (табл. 96).

Таблица 96

**Расходы влаги ( $m^3$ ) на 1 ц зеленой массы и зерна кукурузы  
в Кулундинской степи**

Поле	На 1 ц зеленой массы		На 1 ц зерна	
	1956 г.	1957 г.	1956 г.	1957 г.
Неорошаемое . . . . .	13,9	6,6	225,3	76,8
Полив				
в фазу выметывания	—	5,7	—	46,2
при 50% НВ . . . . .	13,6	6,8	156,9	58,3
при 70% НВ . . . . .	—	7,4	—	62,2

Другие исследователи также указывают, что наиболее продуктивно влага используется кукурузой во вторую половину вегетационного периода [25, 43, 235]. Повышение эффективности использования влаги кукурузой на орошаемых полях по сравнению с неорошаемыми имело место лишь в отношении урожая зерна. При орошении эффективность была в 1956 г. примерно в 1,5 раза выше (в зависимости от схем полива), чем без орошения, а в 1957 г. — в 1,2—1,6 раза выше.

Сопряженные двухлетние наблюдения над влажностью почвы, погодными условиями и состоянием растений позволили установить количественные связи между агрометеорологическими условиями, ростом и урожаем кукурузы при орошении. Зависимость линейного прироста кукурузы от агрометеорологических условий выразилась уравнением

$$\Delta H = 0,25W + 1,04t + 0,03m - 11,5, \quad (106)$$

$$r = 0,81 \pm 0,04, \quad E_{50} = \pm 3,8.$$

Здесь  $\Delta H$  — прирост высоты растений за декаду (см),  $W$  — запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы к началу декады (мм),  $t$  — среднесуточная температура воздуха за декаду,  $m$  — количество осадков за декаду (мм).



Количественные зависимости урожая зеленой массы кукурузы от суммарных расходов за период от выметывания султана до уборки оказались очень тесными, почти однозначными:

$$R = 1,96Q + 77, \quad (107)$$

$$r = 0,98 \pm 0,04, \quad E_{50} = \pm 15.$$

Здесь  $R$  — урожай зеленой массы кукурузы (ц/га),  $Q$  — суммарные расходы влаги за период выметывания султана—уборка зеленой массы кукурузы (мм).

Количество используемой за этот период влаги имеет большое значение также и для формирования урожая зерна кукурузы, что видно из уравнения

$$R = 0,32Q - 8,3, \quad (108)$$

$$r = 0,95 \pm 0,02, \quad E_{50} = \pm 3,4,$$

где  $R$  — урожай зерна (ц/га),  $Q$  — суммарные расходы влаги за период выметывания султана—уборка кукурузы на зерно (мм). Связь почти такая же тесная, как и в уравнении (107). Ошибка уравнения  $\pm 3,4$  ц/га, что составляет 5—10% урожаев кукурузы на орошаемых полях.

### Влияние глубины стояния грунтовых вод на влажность почвы и формирование урожаев орошаемых зерновых культур

Среди факторов, сильно влияющих на водный режим почв и формирование урожаев орошаемых культур, большое значение имеют грунтовые воды. В настоящее время для учета их при установлении режимов орошения обычно пользуются осредненными величинами: величинами подпитывания, представленными в табл. 97 (по Шарову), либо поправочными коэффициентами суммарного испарения, представленными в табл. 98 (по С. А. Алпатьеву).

Таблица 97

**Примерные размеры подпитывания грунтовыми водами (мм/сутки)  
в период вегетации (по Шарову) для полевых культур**

Почвы по механическому составу	Глубина грунтовых вод (м)		
	1,0—1,5	1,5—2,0	2,0—2,5
Суглинистые			
легкие . . . . .	0,8—1,0	0,4—0,8	—
средние . . . . .	1,0—1,2	0,5—1,0	—
тяжелые . . . . .	1,2—1,6	0,8—1,2	0,4—0,8
глинистые . . . . .	1,6—2,5	1,2—1,6	0,8—1,2

Средние поправочные коэффициенты суммарного испарения с полей, занятых культурами, при оптимальном орошении (по С. А. Алпатьеву)

Характер почвы (по механическому составу)	Глубина грунтовых вод (м)			
	3—4	2—3	1—2	< 1
Легкие . . . . .	1,0	0,86	0,66	—
Средние . . . . .	0,96	0,84	0,62	0,41
Тяжелые . . . . .	0,90	0,77	0,60	

Специальные исследования Гидрометцентра СССР, проведенные в период 1961—1963 гг. на полях Ростовской областной опытно-мелиоративной станции (Багаевско-Садковская оросительная система), позволили установить ряд особенностей в режиме влажности почвы и формировании урожаев зерновых культур (кукурузы), обусловленных характером залегания уровня грунтовых вод в период их вегетации [180].

До строительства и ввода в эксплуатацию Багаевско-Садковской оросительной системы грунтовые воды залегали на глубине 6—10 м, в желто-бурых опесчаненных аллювиальных суглинках, водоупором которых является залегающая глубже плотная глина. С вводом в эксплуатацию уровень грунтовых вод повысился в близлежащих к каналу смотровых скважинах на 2—3 м, в удаленных — на 0,2—0,3 м. В настоящее время грунтовые воды залегают в среднем на глубине 4—5 м, местами стоят выше. Исследования проводились на полях (с уклоном 0,002) с посевами средне-позднеспелых сортов кукурузы ВИР-42 и ВИР-156. Результаты систематических наблюдений за высотой стояния грунтовых вод показали, что глубина их залегания крайне неравномерна: в пределах небольших пространств она различается на 1—2 м и больше.

В 1962 г. в первую часть вегетационного периода, пока не начались поливы, в скважине, расположенной в 220 м от канала, глубина стояния уровня грунтовых вод держалась около 210—225 см, а в скважине, находящейся всего лишь в 110 м от нее и в 290 м от канала, — в пределах 140—155 см, т. е. была на 70 см ближе к поверхности. Примерно такое же соотношение уровней воды в указанных скважинах сохранилось и после окончания поливов (август—сентябрь, рис. 48).

В 1963 г. расхождение в глубине стояния грунтовых вод на участке было еще сильнее. В скважине, находящейся на расстоянии 340 м от канала, до начала вегетационных поливов уровень грунтовых вод колебался в пределах 460—410 см. В скважине, расположенной в 740 м от канала, уровень воды в это время держался на глубине 245—225 см, т. е. разница в глубине стояния грунтовых вод в 1963 г. достигала 2 м. В период производства вегетационных поливов она уменьшилась до 1 м и в этих пределах оставалась до конца осени (рис. 48).

Таким образом, можно считать, что пространственная изменчивость глубины залегания грунтовых вод на орошаемых полях в условиях даже очень малых уклонов (0,002) и выравненной поверхности может достигать 0,5—0,7 см на 1 погонный метр.

Наиболее глубоко почвенно-грунтовые воды на орошаемых массивах залегают весной. С началом поливов уровень их резко повышается, особенно после первого полива. В 1963 г., в результате полива по бороздам (при норме 1000 м<sup>3</sup>/га), глубина стояния грунтовых вод на орошаемом участке за 4 суток (с 24 по 28 VI) с 280 см уменьшилась до 140 см, т. е. грунтовые воды поднялись почти на полтора метра. Последующие поливы такого резкого

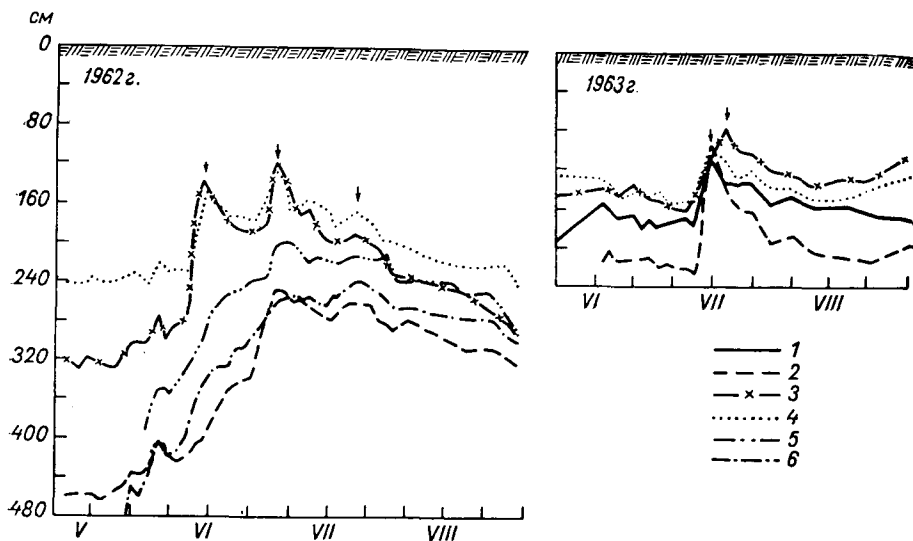


Рис. 48. Глубина стояния грунтовых вод в 1962 и 1963 гг.

1—6 — смотровые скважины за грунтовыми водами; стрелками обозначены поливы.

подъема грунтовых вод не вызвали, но все же каждый из них существенно отразился на стоянии их уровней.

Характерно отметить, что даже на контрольном участке, где поливов не производилось и, следовательно, пополнения грунтовых вод за счет просачивания поливной воды сверху происходить не могло, с началом поливов окружающего массива уровень воды существенно повысился. С 22 по 28 VI по одной скважине он поднялся на 38 см (с 341 до 303 см), по другой — на 67 см (с 410 до 343).

Наблюдения также показали, что уровень грунтовых вод на орошаемых массивах может повышаться и в тех случаях, когда поливов непосредственно на этом массиве не производится, но через его территорию по межхозяйственному каналу подается вода на поля соседних хозяйств. Так, в 1963 г. в связи с наполнением канала водой и подачей ее в соседний совхоз уровень воды во всех

без исключения скважинах 17 VI поднялся на 15—35 см (в зависимости от места их нахождения), несмотря на то что наблюдаемый массив в это время еще не орошался. Когда же подача воды в совхоз была прекращена, то уровень воды на наблюдаемом массиве начал постепенно опускаться до тех пор, пока не начался полив в той или иной части самого массива, вызвавший, как уже ранее говорилось, резкий подъем грунтовых вод.

Описанная изменчивость глубины залегания грунтовых вод соответствующим образом сказалась на динамике почвенной влажности. Сопоставление динамики влажности почвы с глубиной стояния грунтовых вод позволяет выявить следующие характерные особенности водного режима почвы.

Если грунтовые воды в течение всего года залегают глубоко, более 5 м от поверхности, то водный режим верхнего полутораметрового слоя почвы находится вне влияния их уровня. При таком залегании почвенно-грунтовых вод на участках как неорошаемых, так и орошаемых влажность почвы никогда не бывает выше наименьшей влагоемкости и во вторую часть вегетационного периода почти во всем полутораметровом слое опускается ниже 70, а к концу его ниже 50 и даже 30% НВ<sup>1</sup>. На участках же неорошаемых при указанной глубине почвенно-грунтовых вод верхний полуметровый слой иссушается до 30% НВ уже к началу цветения кукурузы, метровый — ко времени наступления молочной спелости. К концу вегетации до указанного предела иссушается и весь полутораметровый слой, причем в самом верхнем пахотном горизонте, если осадков не выпадает или они незначительны, во весь этот период, более 2 месяцев, продуктивной влаги совсем не имеется (рис. 49, 1961 г.).

При неустойчивом режиме грунтовых вод, когда в начале вегетационного периода они также залегают глубже 5 м, а затем постепенно поднимаются и временами достигают высоты 250—225 см, некоторое влияние их на водный режим верхнего полутораметрового слоя уже сказывается. Прежде всего оно проявляется в том, что начиная с 1 м и глубже при указанном уровне грунтовых вод влажность почвы в течение всего периода вегетации не опускается ниже 70% НВ, а в моменты наибольшего подъема грунтовых вод на глубине 140, 150 см, хотя и слабо, но увеличивается за счет подпитывания снизу. Вместе с тем характерно, что выше наименьшей влагоемкости при описанных условиях влажность почвы не повышается. Что касается верхних слоев, то при отсутствии орошения они так же, как и при глубоком залегании грунтовых вод, сильно иссушаются, до 30% НВ и сильнее. Однако такое иссушение почвы наблюдается лишь до глубины 60 см и лишь к концу вегетации достигает 80 см, причем отсутствие продуктивной влаги в пахотном горизонте бывает менее длительным, чем описано выше (рис. 49, 1963 г., неорошаемый участок).

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем наименьшая влагоемкость выражена в миллиметрах продуктивной влаги.

В тех случаях, когда грунтовые воды залегают весной на глубине 3—4 м, а летом временами достигают 1,5 м и несколько

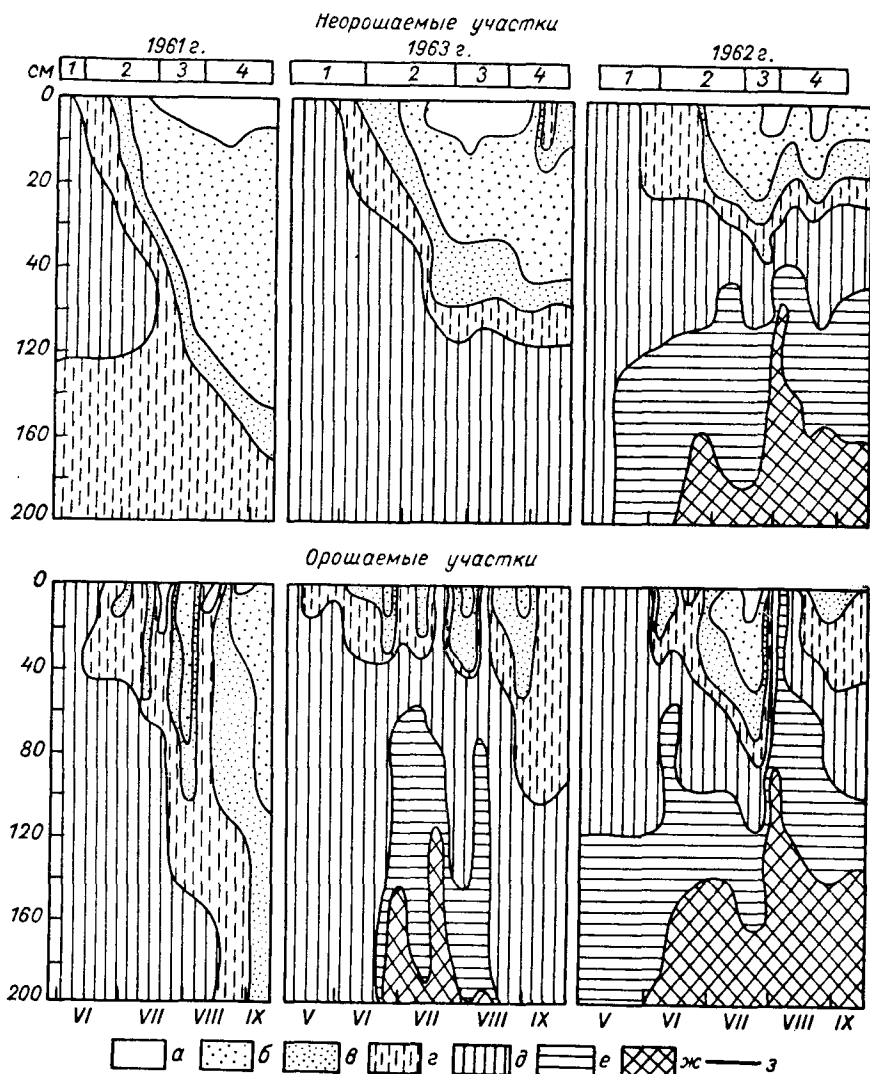


Рис. 49. Влажность почвы на участках с различной глубиной стояния грунтовых вод.

а — ниже влажности устойчивого завядания, б — влажность устойчивого завядания — 30% НВ, в — 30—50% НВ, г — 50—70% НВ, д — 70—100% НВ, е — наименьшая — полная влагоемкость, ж — полная влагоемкость, з — глубина стояния грунтовых вод (см). Фазы развития кукурузы: 1 — посев — выход в трубку, 2 — выход в трубку — цветение, 3 — цветение — молочная спелость, 4 — молочная спелость — восковая спелость.

выше, влажность верхнего полутораметрового слоя почвы находится в сильной зависимости от их уровня. Каждому значитель-

ному подъему грунтовых вод соответствует резкое повышение почвенной влажности, связанное с передвижением капиллярной каймы вверх и подпитыванием почвы влагой снизу. В отдельных случаях верхняя граница капиллярной каймы с влажностью, превышающей наименьшую влагоемкость, всего лишь на 60—70 см не достигает поверхности почвы. Непосредственно к ней примыкает слой почвы, насыщенный до 70—100% НВ. В более поверхностных слоях в связи с выпадающими осадками и поливами, а возможно, и влиянием капиллярной каймы влажность почвы большую часть вегетационного периода колеблется в пределах 50—70 и 30—50% НВ и лишь в пахотном горизонте временами опускается ниже 30% НВ. Полного же отсутствия запасов продуктивной влаги в пахотном горизонте не наблюдается.

Характерно отметить, что в описанных выше случаях вклинивания грунтовых вод в толщу верхнего полутораметрового слоя почвы спад их происходит очень быстро, влажность же почвы, вызванная подъемом грунтовых вод, еще значительное время после их спада держится на высоком уровне: превышает наименьшую влагоемкость (рис. 49, 1963 г., орошаемый участок).

И наконец самое сильное влияние грунтовых вод на водный режим почв сказывается в случаях, когда их уровень уже весной находится на глубине, лишь незначительно превышающей 2 м, в летний же период поднимается до 150 см, а во время поливов — до 90, 80 и местами даже 70 см. В этих случаях в слое почвы 100—150 см и в нижележащем грунте большую часть вегетационного периода имеется подпертая снизу капиллярная вода, влажность превышает наименьшую влагоемкость и нередко достигает полной. Большое количество легкоподвижной и легкодоступной для растений воды при указанных выше условиях имеется также в слое почвы 50—100 см. В большую часть лета влажность его составляет 70—100% НВ, а во время сильного подъема грунтовых вод превышает ее. И только лишь в слое почвы, лежащем выше 50 см, притом лишь на неорошаемых полях, влажность почвы в течение всего периода вегетации держится ниже наименьшей влагоемкости. На орошаемых же участках, если поливы производятся по бороздам, и этот слой почвы временами насыщается почти до полной влагоемкости, поскольку при близком уровне грунтовых вод они смыкаются с поливными водами, и капиллярная кайма выходит на дневную поверхность (рис. 49, орошаемый участок, август 1963 г.). Вместе с тем характерно отметить, что при описанном выше режиме грунтовых вод даже на орошаемом участке влажность верхних слоев почвы временами опускается до 50—30 и ниже 30% НВ. На неорошаемых же участках такие периоды более длительны, около 2 месяцев и временами сопровождаются полным отсутствием продуктивной воды в пахотном горизонте.

При сопоставлении водного режима почв с глубиной залегания уровня грунтовых вод выявляется также следующая характерная особенность: чем выше грунтовые воды поднимаются к дневной поверхности, тем сильнее изменяется влажность почвы по верти-

кальному профилю, тем выше ее градиенты. Причина этого явления кроется, очевидно, в том, что в условиях сильного пересыхания верхних слоев почвы корни растений жадно перехватывают воду, поднимающуюся по капиллярам от зеркала грунтовых вод кверху, и не дают ей возможности достичь пахотного горизонта. В результате в условиях антициклонической погоды и больших расходов воды на транспирацию верхние слои почвы длительное время оказываются в сильно пересушенном состоянии в противовес нижним, где высокое стояние грунтовых вод обеспечивает большое количество легкоподвижной и доступной для растений влаги. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении сроков и норм полива. На участках с высоким стоянием грунтовых вод следует назначать поливы, исходя не только из влажности метрового слоя почвы в среднем, но учитывая отдельно и влажность полуметрового слоя. В противном случае длительное пребывание богатых питательными веществами верхних слоев почвы в пересушенном состоянии может вызвать недобор урожаев орошаемых культур в засушливые годы даже на участках с высоким залеганием грунтовых вод.

Поскольку в силу водных свойств почвы давать поливы малыми нормами по бороздам невозможно, а большие нормы могут вызвать подъем грунтовых вод и смыкание их с поливными водами, на полях с близким стоянием грунтовых вод орошение целесообразно производить способом дождевания.

Наиболее напряженные условия увлажнения верхних слоев почвы в сочетании с переувлажнением нижних слоев наблюдаются во вторую половину вегетационного периода. Столь сильное воздействие глубины стояния грунтовых вод на водный режим почв соответствующим образом сказывается и на состоянии растений. В табл. 99 представлены данные высоты, диаметра стебля, элементов структуры и размеров урожая среднепозднеспелых сортов кукурузы, произраставших на описанных участках с различной глубиной стояния грунтовых вод в 1961—1963 гг.

В 1961 г., когда грунтовые воды залегали глубоко и на водный режим почв и состояние растений не воздействовали, урожай кукурузы на орошаемом участке оказался в 2,5 раза (244 %) выше неорошаемого и составил 66 ц/га против 28 ц/га. Соответственно выше были показатели и всех элементов продуктивности: количества озерненных початков, количества имеющихся в них зерен, абсолютного веса зерна и др.

В 1963 г., когда на неорошаемом участке в среднем за вегетационный период уровень грунтовых вод залегал на глубине 280 см, а в отдельные периоды поднимался до 200 см и оказывал существенное воздействие на водный режим почвы и водоснабжение растений, урожай кукурузы на орошаемом участке лишь в 1,5 раза превышал неорошаемый, несмотря на то что на орошаемый участок в 1963 г. было дано 3500 м<sup>3</sup>/га поливной воды.

В 1962 г., когда на неорошаемом участке средняя за вегетационный период глубина залегания уровня грунтовых вод соста-

Таблица 99  
Условия водоснабжения и урожай кукурузы на участках с различной глубиной стояния грунтовых вод

Элемент	1961 г.				1963 г.				1962 г.			
	неорошаемый участок	участок, орошаемый по бороздам при 80% НВ	разница между орошаемым и неорошаемым участками		неорошаемый участок	участок, орошаемый по бороздам при 80% НВ	разница между орошаемым и неорошаемым участками		неорошаемый участок	участок, орошаемый по бороздам при 80% НВ	разница между орошаемым и неорошаемым участками	
			в абсолютных единицах	%			в абсолютных единицах	%			в абсолютных единицах	%
Глубина стояния грунтовых вод, средняя за период вегетации кукурузы (см) . . . . .	> 5,0	> 5,0	0	0		2,82*	-0,77*	73*	1,61	1,33	-0,27	82
Глубина стояния грунтовых вод, наименьшая за период вегетации кукурузы (см) . . . . .	> 5,0	> 5,0	0	0		2,26*	-1,08*	52*	1,01	0,80	-0,21	80
Количество осадков за период вегетации кукурузы (мм) . . . . .	115	115	0	100	140	140	0	100	139	139	0	100
Суммарные расходы воды за период вегетации кукурузы (мм) . . . . .	226	435	+209**	193	224	398	+174	178				
Вес зеленой массы кукурузы при появлении нитей початков (ц/га) . . . . .	296	374	+78	126	262	284	+22	108	321	375	+54	117
Высота растений при уборке кукурузы на зерно (см) . . . . .	138	194	+56	140	178	234	+56	130	200	209	+9	104
Диаметр стебля кукурузы при уборке кукурузы на зерно (см) . . . . .	2,2	2,6	+0,4	118	2,7	2,9	+0,2	110	2,3	2,6	+0,3	112
Количество озерненных початков на одном растении . . . . .	0,81	1,02	+0,22	125	1,05	1,15	+0,10	109	1,10	1,10	0	100
Количество зерен в основном початке	395	591	+196	150	509	749	+240	147	554	581	+27	105
Вес зерна в основном початке при 14% влажности (г) . . . . .	91	151	+60	165	131	205	+74	157	154	166	+12	108
Абсолютный вес зерна при 14% влажности (г) . . . . .	230	256	+26	112	245	280	+35	114	307	309	+2	101
Урожай зерна кукурузы (ц/га) . . . . .	27,9	65,9	+38,0	244	43,8	66,9	+23,1	152	77,3	90,2	+12,9	11,7

Примечание. 1. Звездочкой (\*) отмечена средняя из показаний двух расположенных на неорошаемом участке смоторных скважин. 2. Знак плюс (+) означает, что данный показатель на орошаемом участке выше, чем на неорошаемом.



вила 172 см, а в отдельные периоды грунтовые воды поднимались до 108 см и очень сильно влияли на водный режим почв и водоснабжение растений, урожай орошаемого участка всего лишь на 17% превысил урожай неорошаемого: 90 ц/га против 77 ц/га. В соответствии с малой разницей урожаев незначительными оказались и различия в величинах отдельных элементов продуктивности кукурузы.

### Эффективность орошения зерновых культур

Расчеты потребности посевов в воде и оценку эффективности орошения обычно производят по коэффициенту водопотребления, т. е. по суммарным расходам воды, затрачиваемым посевами в период их вегетации на построение единицы урожая. Суммарные расходы включают в себя как продуктивный (транспирация), так и непродуктивный (испарение с поверхности почвы) расход воды. В засушливые годы с плохими условиями водоснабжения и низкими урожаями коэффициенты водопотребления бывают очень высокими из-за больших непродуктивных расходов воды по сравнению с продуктивными. В годы же с хорошим водоснабжением, наоборот, они бывают очень низкими. Поэтому связь коэффициентов водопотребления с величиной урожая носит криволинейный характер. Это видно на примере яровой пшеницы и кукурузы. Чем выше урожай орошаемой культуры, тем ниже коэффициент водопотребления растений. У яровой пшеницы, например, при величине урожая 35 ц/га коэффициент водопотребления составляет около 1200, при урожае 10 ц/га он возрастает до 2200 на 1 ц зерна. На богарных же землях в годы сильных засух (при урожае 2 ц/га) коэффициенты водопотребления возрастают до 5000 (рис. 50). Причина в том, что в этих случаях суммарные расходы очень малы и преобладающая часть воды тратится непроизводительно на испарение с поверхности почвы. Последнее, как показывают экспериментальные данные, составляет большую величину, 800—1000 м<sup>3</sup>/га за период вегетации яровой пшеницы и 1500—2000 м<sup>3</sup>/га за период вегетации кукурузы [183].

При агрометеорологическом обслуживании орошаемого хозяйства удобнее пользоваться связями между величинами урожая и суммарными расходами воды. Эти связи обычно имеют прямолинейный характер и дают непосредственный ответ на вопрос о том, какое количество воды необходимо дать при орошении, чтобы получить заданный урожай. Пример такой связи представлен на рис. 51. График построен по тем же данным, что и на рис. 50, и отражает зависимость урожаев яровой пшеницы и кукурузы от суммарных расходов воды в период вегетации этих культур в засушливых районах Западной Сибири, Казахстана, Поволжья и Северного Кавказа.

В аналитическом выражении связь урожаев зерновых культур  $y$  с суммарными расходами воды  $x$  по этим территориям дана

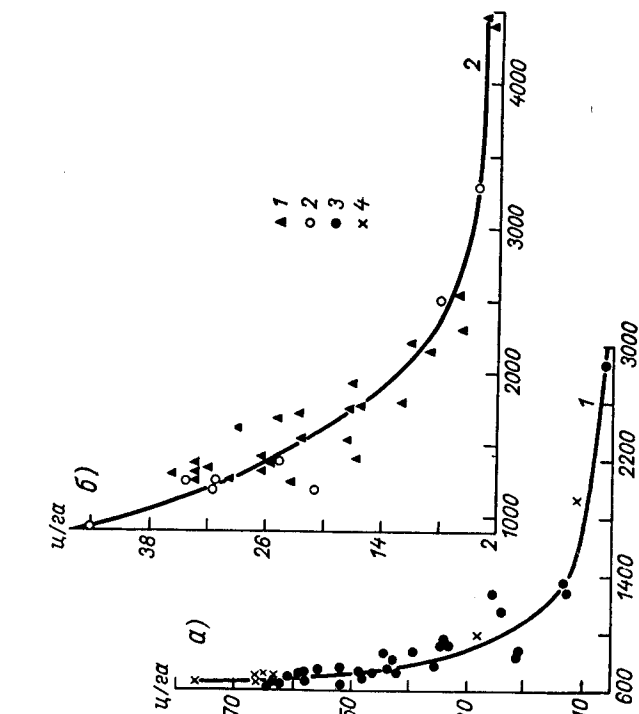


Рис. 50. Связь урожаев (ц/га) зерна кукурузы (а) и яровой пшеницы (б) с коэффициентами водопотребления.  
1 — Кулундинская степь, 2 — Оренбургская степь, 3 — Поволжье, 4 — Северный Кавказ.

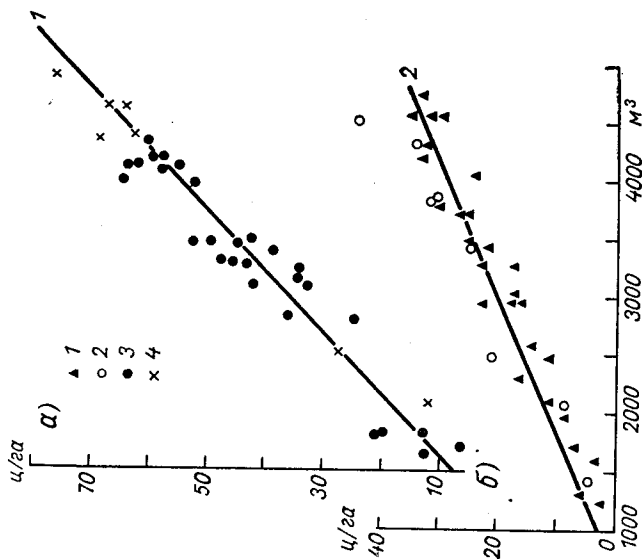


Рис. 51. Связь урожаев (ц/га) зерна кукурузы (1) и яровой пшеницы (2) с суммарными расходами влаги ( $\text{М}^3$ ) за период вегетации.

Усл. обозначения см. рис. 50.

в табл. 100. Из таблицы видно, что, несмотря на большую удаленность этих территорий друг от друга и на различие в почвенном покрове, связь урожаев зерновых культур с суммарными расходами воды за период их вегетации имеет один и тот же вид и лишь несколько отличается значениями коэффициентов при  $x$  и величиной свободных членов. В отношении яровой пшеницы, например, даже максимальные расхождения между рассчитанными по различным формулам величинами урожаев и суммарных расходов воды не выходят за пределы 8—12% рассчитываемых величин. Коэффициенты корреляции между урожаями зерновых культур и суммарными расходами воды за период их вегетации достаточно высокие: у яровой пшеницы колеблются от 0,78 до 0,94, у кукурузы составляют 0,96.

Анализ связи показывает, что на суглинистых почвах при суммарных расходах, больших 800 м<sup>3</sup>/га, каждые добавочные 100 м<sup>3</sup> воды дают прирост урожая зерна яровой пшеницы 1 ц/га. На супесчаных почвах эффективность орошения несколько ниже. Для получения добавочного центнера зерна здесь требуется дополнительно дать 111 м<sup>3</sup> воды. Эффективность использования воды кукурузой (среднепозднеспелых сортов типа ВИР-42) при суммарных расходах, больших 1500 м<sup>3</sup>/га, составляет 1 ц/га зерна на каждые добавочные 55 м<sup>3</sup> воды. Для производства таких расчетов требуются данные суммарных расходов воды зерновыми культурами в различные по метеорологическим условиям годы как на орошаемых, так и на неорошаемых землях, для чего необходимы ежегодные сведения о запасах влаги в почве в начале и конце периода вегетации культуры и данные о выпавших в это время осадках.

Сведения об осадках могут быть легко получены из материалов наблюдений сети агро- и гидрометеостанций. Сеть станций, определяющих влажность почвы, недостаточно густа. Поэтому данные о запасах влаги в почве нередко приходится получать расчетным путем (по температуре воздуха и осадкам). Для этого при расчете запасов влаги к началу вегетации сельскохозяйственных культур используются уравнения (53) и (55), глава VII. Для расчета изменений запасов влаги в вегетационный период используется уравнение вида

$$\Delta W = at + bm + cW + l$$

[глава VII, уравнение (56)]. На основе таких расчетов ниже представлено районирование эффективности орошения яровой пшеницы в засушливых районах Европейской территории СССР, Западной Сибири и Казахстана. Оно выполнено по материалам многолетних наблюдений 225 агрометеорологических и гидрометеорологических станций Гидрометслужбы СССР. Для установления повторяемости изучаемого явления по 30 характерным станциям расчеты были выполнены в разрезе отдельных лет, использовано 850 годовых станций.

Связь урожая яровой пшеницы и кукурузы  $y$  с суммарными расходами воды за период вегетации  $x$ 

Район исследований	Почва	Культура	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Ошибка уравнения ( $\sigma/y$ )	Предел применения уравнения	
						ц/га	м <sup>3</sup> /га
Кулундинская степь	Темно-каштановые супеси, суглинки . . . . .	Яровая пшеница	$y = 0,090x - 6,8$	0,94	$\pm 2,3$	5,0—43,0	1300—4700
Северный Казахстан	Темно-каштановые и южночерноземные суглинки	"	$y = 0,104x - 8,0$	0,78	$\pm 2,0$	0,5—20,0	750—2500
Поволжье, Оренбургская степь	Южные тяжело-суглинистые черноземы . . . .	"	$y = 0,103x - 8,1$	0,91	$\pm 2,5$	4,0—44,0	1500—4700
Поволжье, Северный Кавказ	Обыкновенный и предкавказский тяжело-суглинистые черноземы . . . .	Кукуруза	$y = 0,190x - 20,0$	0,96	$\pm 5,1$	8,0—77,0	1500—5000

В основу выявления районов эффективности орошения положены изложенные выше зависимости урожаев зерна яровой пшеницы от используемых ею в период вегетации количеств воды (суммарных расходов).

Эффективность орошения — прибавка урожаев зерна — рассчитывалась как разность между урожаями пшеницы при орошении ее оптимальными нормами и в естественных условиях увлажнения — на богаре.

За максимальный урожай при орошении принят средний из максимальных урожаев пшеницы, получаемых в степных районах Заволжья и в Кулундинской степи при рациональном режиме орошения, высокой агротехнике, отсутствии засоления, при глубоком залегании грунтовых вод; он равен 35 ц/га [137, 142, 183, 248]. Небезынтересно отметить, что, по данным Бюро переписи США, средний по 18 западным штатам Америки урожай орошаемой яровой пшеницы близок к вышеуказанному (32,0 ц/га), неорошаемой — всего 9,4 ц/га [147].

Соответствующие урожаю 35 ц/га суммарные расходы воды 4600 м<sup>3</sup>/га при произрастании пшеницы на супесчаных и легкосуглинистых почвах и 4200 м<sup>3</sup>/га при произрастании на суглинистых почвах (см. уравнения в табл. 100) приняты за оптимальное водопотребление яровой пшеницы, а разность между этой величиной и суммарными расходами влаги в естественных условиях (на богаре) принята в качестве оптимальной оросительной нормы.

Для того чтобы получить максимальные прибавки урожаев орошаемой культуры, необходимо не только правильно рассчитать оптимальные оросительные нормы, но и правильно распределить их во времени в соответствии с условиями погоды и потребностью растений во влаге в различные отрезки вегетации, т. е. обеспечить оптимальные сроки и нормы поливов. Поэтому, кроме оптимальных оросительных норм, был произведен расчет оптимальных сроков и норм полива.

Расчет оптимальных поливных норм и сроков полива яровой пшеницы производился с учетом следующих положений: а) глубина промачиваемого слоя 1 м; б) нижний предел увлажнения 70% НВ, выраженной в единицах продуктивной влаги; в) верхний предел увлажнения для суглинистых почв 1800 м<sup>3</sup> продуктивной влаги (наименьшая влагоемкость), для почв легкосуглинистых и супесчаных 1600 м<sup>3</sup>. Отсюда оптимальная поливная норма для почв легкого механического состава была принята равной 930 м<sup>3</sup>/га, для почв тяжелого механического состава 1000 м<sup>3</sup>/га.

Запасы продуктивной влаги в почве ко времени сева яровой пшеницы брались по фактическим данным или рассчитывались по уравнениям (53), (55). Время снижения влажности почвы до предела, при котором требуется полив, рассчитывалось с использованием уравнения типа (105), по данным температуры и осадков, наблюдаемых на станциях.

В связи с тем что техника орошения сельскохозяйственных культур в хозяйственных условиях не всегда бывает выдержана и

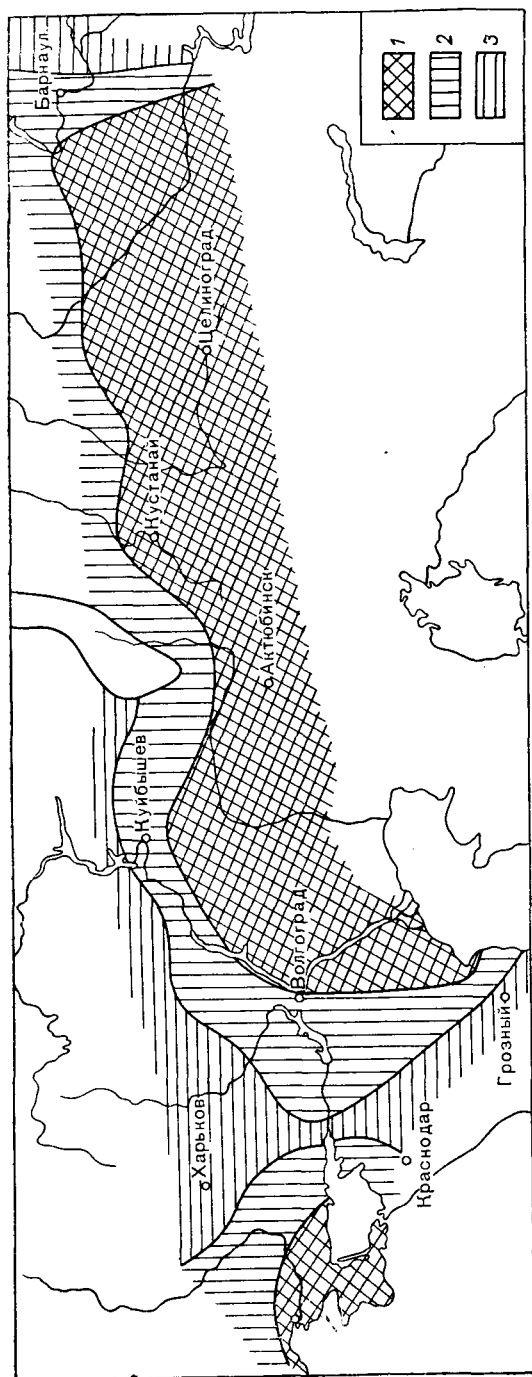


Рис. 52. Зоны эффективности орошения зерновых культур (яровой пшеницы).  
 1 — устойчиво высокая эффективность, 2 — высокая, 3 — умеренная.

резервы поливных вод не всегда достаточны, дополнительно к вышеизложенному были сделаны расчеты оросительных норм для получения урожаев 25 ц/га. При этом расчет оросительных норм под урожай 25 ц/га так же, как и под урожай 35 ц/га, производился из предположения, что нормы орошения, обеспечивающие такие урожаи, должны быть даны не менее чем в 80% лет.

На основе такого расчета выделены три зоны, которые могут быть приняты в качестве фоновых характеристик эффективности орошения яровой пшеницы на территории степных районов СССР [184].

I. Зона устойчиво высокой эффективности орошения (рис. 52) характеризуется среднегодовыми суммарными расходами влаги яровой пшеницы в богарных условиях 1300—1800 м<sup>3</sup>/га и средними урожаями на богаре всего лишь 5—10 ц/га.

При обеспеченности пшеницы оптимальными оросительными нормами в 80% лет максимальные прибавки урожаев на территории зоны составят 28—34 ц/га, а требуемые для этого максимальные оптимальные оросительные нормы — 2800—3600 м<sup>3</sup>/га. В наиболее благоприятные по метеорологическим условиям годы нормы могут быть снижены до 2000—2400 м<sup>3</sup>/га при обеспечении прибавки урожаев пшеницы 20—22 ц/га.

Для получения высоких урожаев (35 ц/га) в 80% лет на территории зоны в зависимости от района необходимо производить от двух до четырех поливов, причем четвертый полив требуется не на всей территории, а лишь в самой засушливой части зоны (Павлодарская и Астраханская области).

В благоприятные по метеорологическим условиям годы (сумма осадков за период вегетации яровой пшеницы  $\geq 170$  мм) требуется произвести лишь два полива. Однако количество таких лет здесь очень невелико, около 10%.

Для получения урожаев пшеницы 25 ц/га оросительные нормы, естественно, намного снижаются. При обеспеченности таких урожаев в 80% лет на преобладающей части территории максимальная оросительная норма составит 2000—2500 м<sup>3</sup> воды, а в наиболее северной ее части 1700—2000 м<sup>3</sup>.

II. Зона высокой эффективности орошения включает в себя территорию, на которой среднегодовые суммарные расходы влаги в естественных условиях увлажнения составляют 1700—2500 м<sup>3</sup>/га, а обеспечиваемые ими среднегодовые урожаи яровой пшеницы при высокой агротехнике ее возделывания — 10—15 ц/га.

При обеспеченности посевов оросительной водой в 80% лет максимальное увеличение урожая составит 24—28 ц/га, а соответствующие этим урожаям максимальные оптимальные оросительные нормы — 2400—2800 м<sup>3</sup>/га.

Минимальная оросительная норма в наиболее влажные годы в этой зоне колеблется от 1100 до 1700 м<sup>3</sup>/га и обеспечивает прибавки урожаев 10—15 ц/га. На территории этой зоны (также в зависимости от района) необходимо давать один—три полива. В особо благоприятные годы (5—10% лет, когда сумма осадков

за вегетационный период составляет 200—250 мм), потребность растений во влаге обеспечивается одним поливом.

Для получения урожаев пшеницы 25 ц/га при их обеспеченности водой 80% величина максимальной оросительной нормы колеблется от 1500 до 2000 м<sup>3</sup>/га, исключая предгорные районы, где она несколько меньше.

III. Зона умеренной эффективности орошения характеризуется среднесезонными расходами влаги в богарных условиях 2500—3000 м<sup>3</sup>/га и при высокой агротехнике среднесезонными урожаями пшеницы 15—20 ц/га. При обеспеченности оросительной водой в 80% лет максимальные прибавки урожаев пшеницы в этой зоне не превысят 19—24 ц/га, а требуемые для этого максимальные оптимальные оросительные нормы составят 1900—2400 м<sup>3</sup>/га. В наиболее влажные годы (в 5—10% лет) орошение здесь совсем не требуется. В сухие же годы (в 10—25% лет) даже и здесь на преобладающей части территории прибавки урожая при орошении оптимальными нормами составят более 20—25 ц/га и лишь в предгорных районах Европейской территории СССР — 15—20 ц/га.

Для обеспечения урожаев яровой пшеницы 35 ц/га в 80% лет на преобладающей части этой зоны необходимо давать один-два полива. В благоприятные же по метеорологическим условиям годы достаточно дать один полив, причем только в наиболее засушливой части зоны. Для получения урожаев пшеницы 25 ц/га величины максимальных оросительных норм здесь варьируют от 1000 до 1500 м<sup>3</sup>/га.

В заключение следует сказать, что описанные выше зоны различной эффективности орошения относятся к территории, где грунтовые воды залегают на глубинах, исключающих возможность непосредственного подпитывания ими сельскохозяйственных культур и где химический состав используемых при орошении вод исключает возможность засоления.

Следует также еще раз оговорить и то, что принятые при расчете оптимальных оросительных норм средние максимальные урожаи зерна яровой пшеницы (35 и 25 ц/га) и обеспечивающие их оптимальные оросительные нормы соответствуют современному уровню техники поливов. С совершенствованием последних они могут измениться. Однако сравнительная характеристика территории в отношении эффективности орошения яровой пшеницы останется примерно той же.



## Глава XII

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ И ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ТЕРРИТОРИИ СССР

Многолетние материалы наблюдений массовой сети станций Гидрометслужбы СССР и установленные зависимости состояния и формирования урожаев сельскохозяйственных культур от условий водоснабжения позволяют дать характеристику обеспеченности их почвенной влагой на территории СССР. Поскольку наиболее массовые и систематические, охватывающие всю земледельческую зону СССР наблюдения имеются по зерновым культурам, то агро-гидрологическая характеристика территории дается в отношении этих культур. В основу ее положены среднемноголетние запасы продуктивной влаги, колебания их по годам и описанные выше закономерности формирования запасов влаги в почве и их воздействия на продуктивность зерновых культур.

Карты запасов продуктивной влаги составлены по материалам наблюдений над влажностью почвы 360 гидрометеостанций в основном с длительностью наблюдений 10—20 лет. Часть станций (около 30%) имеет материалы наблюдений за 20—30 лет и отдельные станции — свыше 30 лет. Кроме того, в качестве вспомогательных материалов при картировании использованы данные некоторых станций, имеющих и более короткие ряды наблюдений. Следует отметить, что Азиатская территория СССР освещена наблюдениями значительно слабее, чем Европейская. Особенно мало данных по влажности почвы на территории восточнее 105° в. д. Так, в Забайкалье характеристика влагозапасов дана по материалам лишь пяти станций. Карты схематичны. При их составлении учитывалась топография, характер почвенного покрова и естественная растительность.

При выведении среднемноголетних запасов продуктивной влаги в почве производилось пополнение данных за пропущенные сроки наблюдений расчетным путем, поскольку при сравнительно коротких рядах наблюдений (10—20 лет) исключение этих сроков могло заметно отразиться на средних величинах, особенно если пропуски имели место в годы с аномальными условиями погоды. Расчеты производились для каждого пропущенного срока на основе закономерностей, изложенных в главе VII.

Запасы продуктивной влаги формируются в результате совокупного длительного взаимодействия погоды, почвы и растения. Поскольку все действующие факторы распределены по территории

закономерно, то распределение запасов продуктивной влаги по территории как их производной также закономерно. Закономерно по территории распределяется и динамика запасов продуктивной влаги в течение года. Кривая годового хода влажности почвы на той или иной территории повторяется из года в год, лишь немного отклоняясь от средней типовой. Соответственно пространственному распределению динамики запасов почвенной влаги закономерно по территории распределена обеспеченность влагой сельскохозяйственных культур как в отдельные отрезки, так и на протяжении всего периода их вегетации.

### **Запасы продуктивной влаги и влагообеспеченность озимых культур**

Для огромной территории Советского Союза с большим разнообразием климатов целесообразно характеризовать распределение запасов продуктивной влаги и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в разрезе календарных сроков. Одни и те же культуры в одни и те же даты в различных районах находятся в разных фазах развития и имеют различную потребность во влаге. Поэтому в агрономическом отношении условия влагообеспеченности в календарных датах несравнимы. Их характеристику лучше давать по фазам развития растений.

На территории Советского Союза время массового сева озимых культур повсеместно близко совпадает с переходом температуры воздуха через  $15^{\circ}\text{C}$  осенью, колеблясь в узких пределах около этой даты. Осенний же рост озимых в основном заканчивается ко времени перехода среднесуточной температуры воздуха через  $5^{\circ}\text{C}$ . Позднее вегетация озимых носит прерывистый характер (либо в дневные часы, либо в случаях возврата тепла) и вследствие кратковременности и малой интенсивности роста не вносит существенных изменений в состояние посевов. Исключение составляют лишь наиболее южные районы, где периоды возврата тепла зимой бывают очень длительными.

Характеристика распределения запасов продуктивной влаги и влагообеспеченности озимых культур дается по материалам наблюдений в колхозах и совхозах, проводимых на озимых, посеянных по чистым парам.

Ко времени массового сева озимых среднесезонные запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы свыше 200 мм наблюдаются в основном на территории, лежащей севернее 60-й параллели, а также в Прибалтийских республиках, в прилегающих к ним районах Белоруссии и центральных областей и в некоторых таежных районах Западно-Сибирской низменности (рис. 53). Изолиния запасов 150 мм проходит приблизительно по линии Калининград—Харьков—Москва—Кудымкар на Европейской территории СССР и по линии Тюмень—Новосибирск—Красноярск на Азиатской территории СССР. Южнее линии Тирасполь—Днепропет-

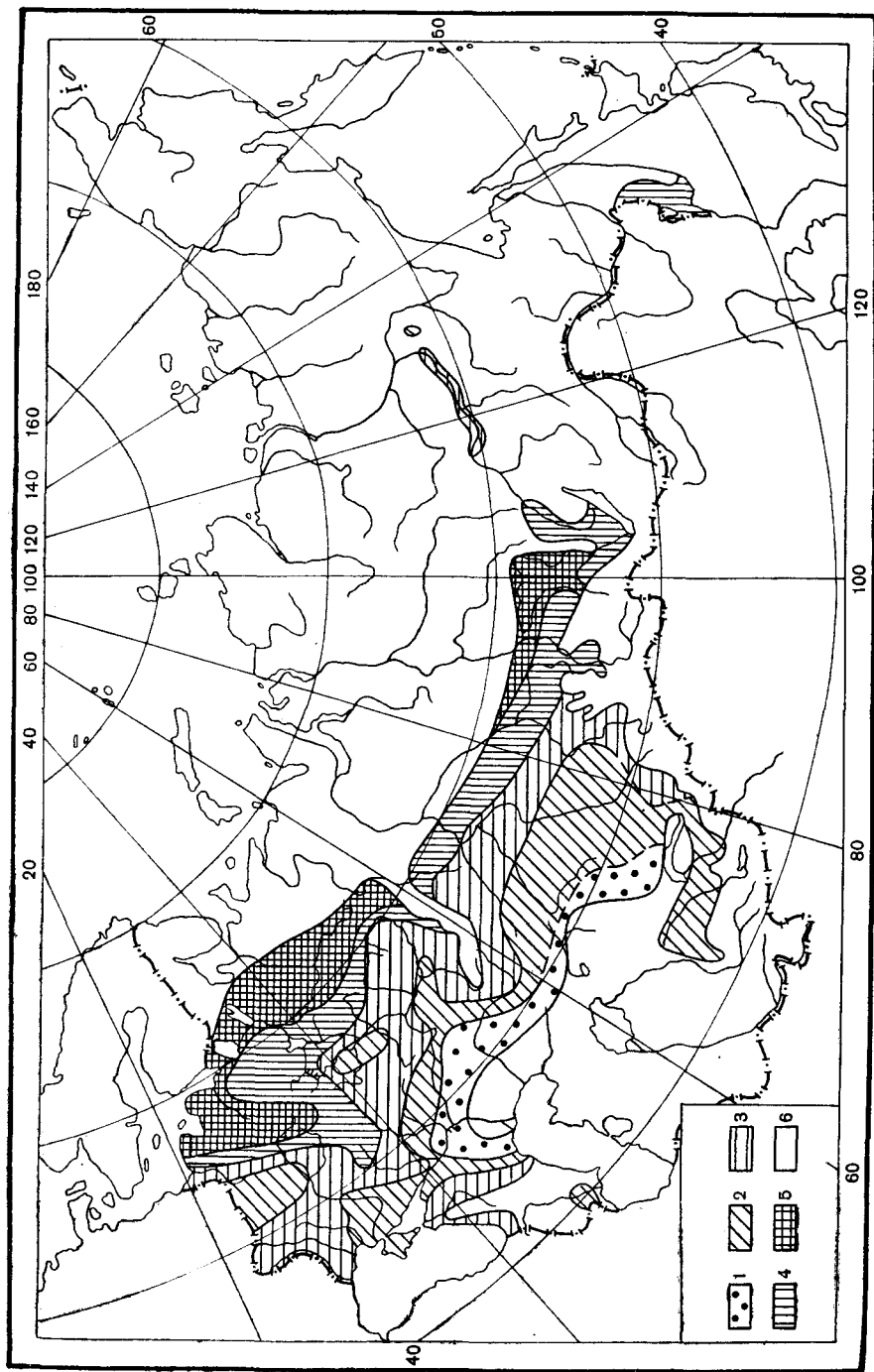


Рис. 53. Среднемноголетние запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы по чистому пару ко времени наступления среднесуточной температуры  $15^{\circ}\text{C}$  осенью.

1 — менее 50 мм, 2 — 50—100 мм, 3 — 100—150 мм, 4 — 150—200 мм, 5 — более 200 мм, 6 — районы горы, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы.

ровск—Воронеж—Пермь, а также Омск—Павлодар запасы продуктивной влаги составляют меньше 100 мм. Такие же малые запасы наблюдаются на песчаных почвах Белоруссии и Верхней Волги. На крайнем Юго-Востоке Европейской территории СССР и в южных степных районах Казахстана, а также в Кулунде запасы метрового слоя почвы ко времени сева озимых даже меньше 50 мм.

Во время осенней вегетации у озимых посевов идет формирование вегетативных органов (листьев и побегов). В этот период корневая система растений находится в верхних слоях почвы и может использовать в основном влагу лишь пахотного горизонта. Ко времени сева в районах с запасами влаги в метровом слое почвы меньше 100 мм многолетние запасы пахотного горизонта не превышают 20 мм ( $pF \approx 3,9$ ), а в наиболее засушливой части территории (с запасами влаги в метровом слое меньше 50 мм) — даже 10 мм ( $pF > 4,0$ ). На этой засушливой части территории более 50% лет всходы озимых задерживаются из-за сухости верхнего слоя. Иногда запасы влаги здесь опускаются так низко, что всходы озимых не появляются в течение всей осени, а иногда происходит и полная гибель посевов.

Устойчиво хорошей водообеспеченностью посевов (из года в год) со средними запасами за период осенней вегетации в пахотном слое почвы больше 40 мм ( $pF \approx 2,7$ ) характеризуются северные и северо-западные районы Европейской территории СССР, Прибалтика, Белоруссия и таежная зона Западной Сибири, а также Приморье (Дальний Восток). В остальных районах СССР в большинстве лет озимые в осенний период также хорошо обеспечены влагой: имеют запасы 30—40 мм ( $pF = 3,4 \div 2,7$ ). Но в отдельные годы условия водоснабжения озимых в этих районах могут быть и существенно хуже оптимальных, особенно в первую половину осени, в связи с чем всходы здесь задерживаются, период осенней вегетации оказывается укороченным и посевы заканчивают осеннюю вегетацию недостаточно раскустившимися.

Весной у озимой ржи в самом начале отрастания, а у озимой пшеницы несколько позже закладываются репродуктивные органы. Этот ранний период весеннего отрастания совпадает с наиболее богатым влагой временем года — периодом, непосредственно следующим за таянием накопленных в снежном покрове зимних осадков, — и с наличием для подавляющей части СССР в почве на некоторой глубине мерзлого, водонепроницаемого слоя. В этот период (возобновление вегетации—выход в трубку) практически повсеместно верхний слой почвы богат влагой, поэтому потребность растений в ней полностью удовлетворена. Запасы пахотного горизонта по всей территории СССР близки к 40 мм или даже больше ( $pF \approx 2,7$ ).

В период выход в трубку—цветение, когда корневая система проникает в почву и использует воду более глубоких слоев, на преобладающей части СССР озимые также хорошо обеспечены влагой: запасы в метровом слое почвы больше 100 мм ( $pF < 3,7$ ).

Лишь в наиболее засушливых районах Юга и Юго-Востока Европейской территории СССР и степной зоны Казахстана бывают годы, когда на озимых, посеянных даже по чистым парам, недостаток влаги обуславливает ухудшение состояния посевов.

В период формирования зерна озимых (цветение—восковая спелость) наблюдается дальнейшее уменьшение запасов влаги и различие в запасах по отдельным районам СССР увеличивается. Но так как в этот период потребность растений во влаге резко снижается, то влагообеспеченность озимых остается примерно такой же, какой она была в предшествующий период, и лишь в крайне засушливых районах несколько ухудшается. В этих районах со среднемноголетними запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы меньше 50 мм ( $pF \geq 4,0$ ) в отдельные, хотя и редкие, годы запасы влаги под озимыми культурами опускаются ниже 25 мм ( $pF > 4,1$ ), что неблагоприятно отражается на наливе зерна.

Таким образом, в отношении условий водоснабжения озимых культур наименее обеспеченным является период осенней вегетации (посев — прекращение роста растений). Условия увлажнения почвы в этот период на значительной части территории нередко решают судьбу урожая, поскольку слаборазвитые из-за недостатка влаги посевы плохо зимуют, а нередко и гибнут.

Как уже говорилось, запасы продуктивной влаги в почве ко времени сева по непаровым предшественникам бывают намного меньше. Поэтому влагообеспеченность озимых на непаровых предшественниках значительно хуже; озимые чаще и на большой территории страдают от недостатка влаги.

### **Запасы продуктивной влаги и влагообеспеченность яровых культур**

Для оценки обеспеченности влагой яровых культур использовались данные наблюдений над влажностью почвы под яровой пшеницей, посеянной по зяби. В тех случаях, когда наблюдений под яровой пшеницей не было, брались данные о влажности почвы под другими ранними яровыми культурами.

Сев яровых зерновых культур может быть начат только после того, как пахотный горизонт нацело оттает и освободится от талых вод: без этого невозможна нормальная заделка семян. Такое состояние полей на большей территории СССР наступает лишь после устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через  $5^{\circ}\text{C}$ .

Весной при наступлении среднесуточной температуры воздуха  $5^{\circ}\text{C}$  и выше почвы лесной и таежной зон и частично лесостепной зоны, характеризующиеся двухчленностью наносов, содержат в метровом слое больше 200 мм продуктивной влаги ( $pF < 2,7$ , рис. 54). Исключение составляют легкие, хорошо дренированные песчаные и супесчаные почвы, где запасы влаги в это время бывают

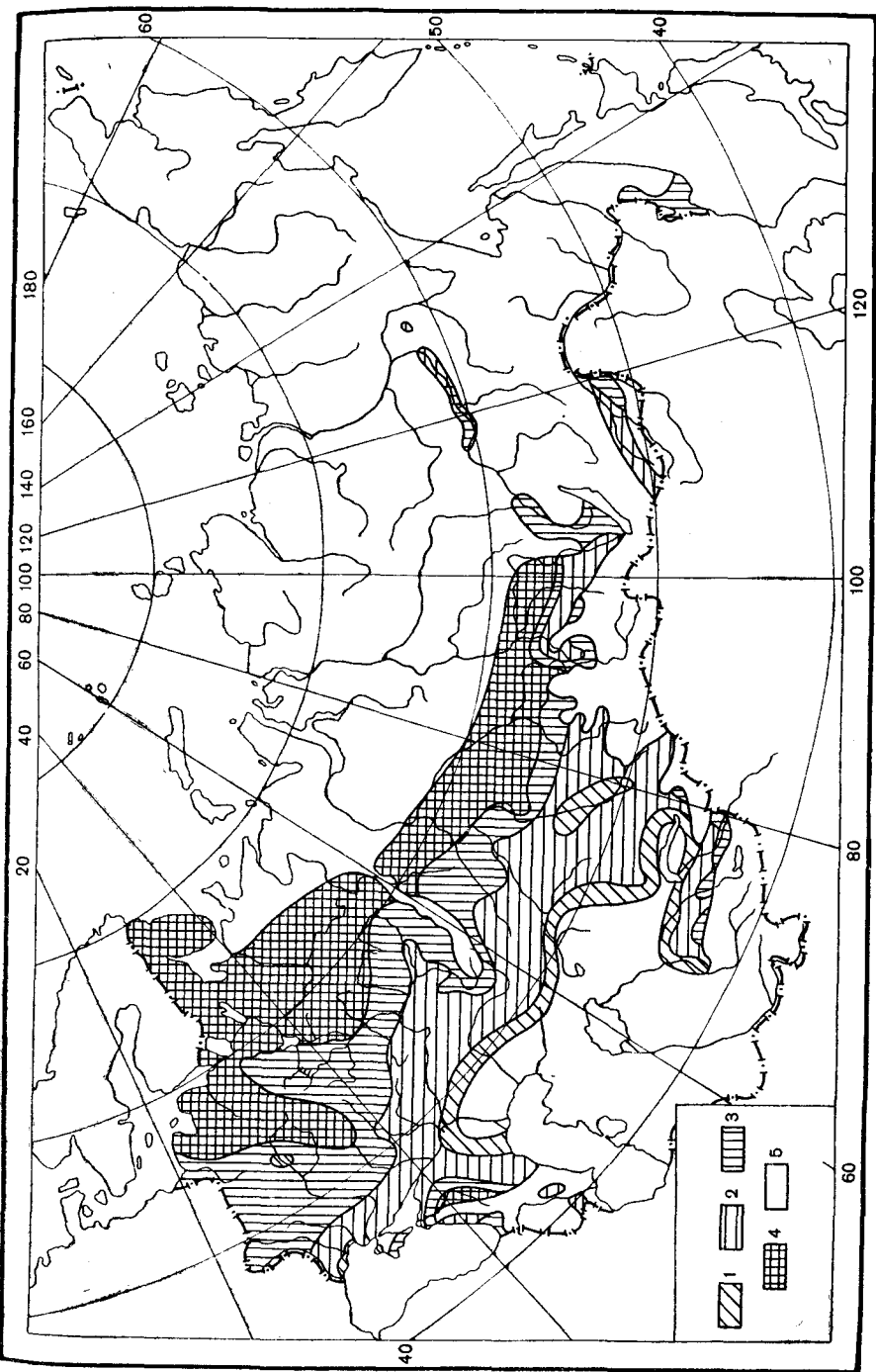


Рис. 54. Среднегодовые запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под зябью ко времени наступления среднесуточной температуры  $5^{\circ}\text{C}$  весной.  
 1 — 50—100 мм, 2 — 100—150 мм, 3 — 150—200 мм, 4 — более 200 мм, 5 — районы горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы.

несколько меньше 200 мм. На всей отмеченной территории в отдельные годы влажность почв может превышать капиллярную влагоемкость, но она никогда не опускается ниже наименьшей влагоемкости ( $pF < 2,7$ ). Только на почвах с двухчленными наносами лесостепной зоны в годы с предшествующей сухой осенью и мало-снежной зимой влажность может быть ниже их наименьшей влагоемкости. В некоторых же районах Прибалтики, северных и северо-западных областях Белоруссии и в отдельных таежных районах Сибири среднегодовое запасы влаги весной составляют больше 250 мм, т. е. бывают близки к полной влагоемкости.

В лесостепной зоне как Европейской, так и Азиатской территории СССР, в основной части степной зоны Западно-Сибирской низменности, на Кубани и на части Ставропольского плато среднегодовое запасы продуктивной влаги в метровом слое близки к наименьшей влагоемкости почв и на суглинистых почвенных разностях колеблются в пределах 150—200 мм ( $pF \approx 2,7$ ). Примерно около 30% лет влажность почвы весной на этой территории бывает ниже наименьшей влагоемкости, а запасы — меньше 150 мм (табл. 101), притом всегда за счет сухости нижних непромоченных слоев. Но даже и в такие годы запасы влаги здесь не бывают меньше 100 мм, что составляет около 70% НВ ( $pF < 3,8$ ).

Таблица 101

Повторяемость лет (%) с различными запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы под зябью ко времени наступления средней суточной температуры 5° С весной

Средне- многолетние запасы влаги (мм)	Запасы влаги в отдельные годы (мм)						
	0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300	300—350
50—100	.	80	10	10	.	.	.
100—150	.	20	60	20	.	.	.
150—200	.	.	20	70	10	.	.
200—250	.	.	.	.	70	30	.

Примечание. Здесь и в последующих таблицах точка (.) означает повторяемость менее 5%.

На остальной части земледельческой территории СССР, исключая сухостепные районы Нижнего Поволжья, северную половину Казахстана и Кулунды, запасы влаги весной составляют 100—150 мм ( $pF \approx 3,8 \div 3,0$ ). Примерно 20% лет почва здесь бывает насыщена до наименьшей влагоемкости (запасы влаги выше 150 мм) и примерно 20% лет влажность почвы не превышает 70% НВ (запасы меньше 100 мм). В отдельные редкие годы в наиболее южных районах запасы влаги весной бывают даже меньше 50 мм ( $pF > 4,0$ ) (табл. 101). В отмеченных выше сухостепных районах среднегодовое запасы влаги весной составляют меньше 100 мм

( $pF > 3,8$ ), вероятность полного промачивания почв очень мала ( $pF = 2,7$ ), около 10% лет.

Пахотный слой почвы в ранневесенний период (при переходе температуры через  $5^{\circ}\text{C}$ ) имеет хорошие запасы влаги: на преобладающей части территории больше 30 мм ( $pF \approx 3,0$ ). По среднегодовым данным, в земледельческой части СССР запасов меньше 20 мм не отмечается. В районах же с запасами влаги в метровом слое почвы, превышающими ранней весной 250 мм, в пахотном слое их содержится больше 60 мм, что нередко является причиной запаздывания здесь начала полевых работ.

В период формирования всходов яровых нормальных сроков сева на преобладающей части территории СССР в пахотном слое почвы обычно продолжают сохраняться запасы продуктивной влаги, достаточные для поддержания удовлетворительного, хорошего и в значительной части районов отличного состояния посевов (запасы 30—60 мм,  $pF \leq 3,5$ ). Но в отдельные годы, характеризующиеся вследствие бездождя быстрым подсыханием самого верхнего слоя почвы (глубина залегания семян), уже и в этот ранний период повсеместно происходят временные задержки всходов из-за недостатка влаги. На Юге и Юго-Востоке Европейской территории СССР, на засоленных почвах Западно-Сибирской низменности, в сухостепных районах Северного Казахстана и в Кулунде, где среднегодовые запасы пахотного горизонта в период посев—кущение меньше 30 мм ( $pF > 3,5$ ), в отдельные годы наблюдается подсыхание всего пахотного горизонта до пределов, когда запасы влаги в нем становятся не только меньше оптимальных, но и меньше удовлетворительных (меньше 20 мм), ( $pF > 3,8$ ). При таких малых запасах посевы яровых слабо укореняются, почти не кустятся, а иногда и выгорают. На песчаных почвах при сильном снижении уровня почвенно-грунтовых вод такие явления наблюдаются и в более северных районах СССР (например, на песчаных почвах Белоруссии).

В период формирования колоса и цветка яровых (выход в трубку—цветение) условия водоснабжения, как уже говорилось, определяют озерненность колоса. В этот решающий для урожая период развития яровых на территории СССР, расположенной севернее линии Черновцы—Харьков—Казань—Оренбург—Курган—Новосибирск—Мариинск—Семипалатинск, запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы обычно близки к оптимальным, больше 100 мм ( $pF < 3,7$ , рис. 55). Недостаток влаги, иногда даже острый, здесь имеет место лишь в отдельные годы. Южнее указанной границы условия увлажнения хуже оптимальных: запасы продуктивной влаги меньше 100 мм. На Юго-Востоке Европейской территории СССР, на Северном Кавказе (исключая Кубань), в степной части Украины, в Крыму и на песчаных почвах Белоруссии и Центральных областей запасы продуктивной влаги метрового слоя даже меньше 80 мм ( $pF > 3,9$ ). Вследствие таких условий водоснабжения состояние посевов в этот период здесь обычно несколько ухудшается по сравнению с предыдущим периодом и



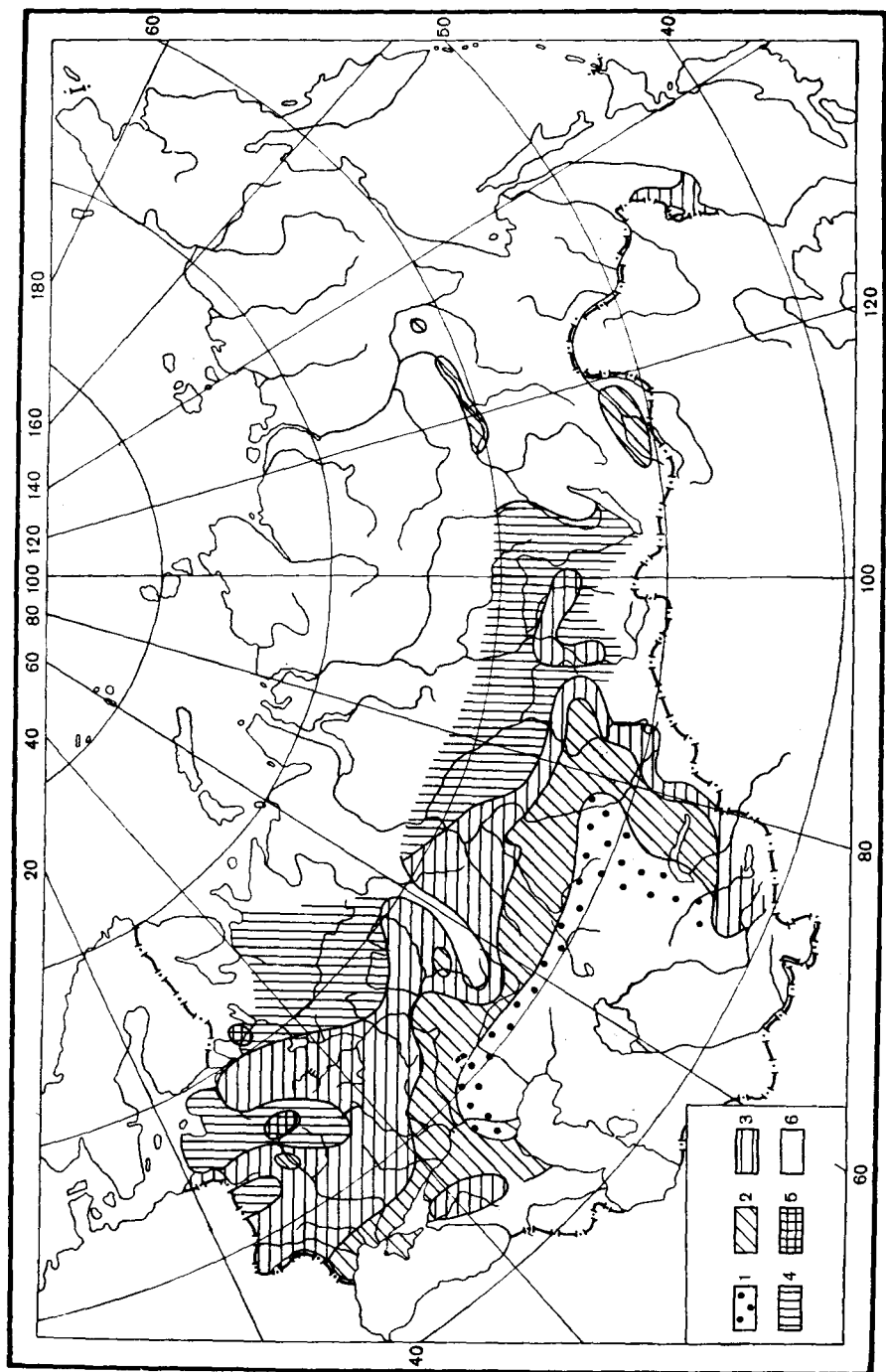


Рис. 55. Среднегодовые запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы в период формирования колоса и цветка яровой пшеницы.

1 — менее 50 мм, 2 — 50—100 мм, 3 — 100—150 мм, 4 — 150—200 мм, 5 — более 200 мм, 6 — районы горные, поливные и слабо изученные, от полейки *влажности почвы*.

значительная часть колосков в колосе остается недоразвитой, предопределяя слабую его озерненность. Повторяемость таких неблагоприятных лет с запасами влаги меньше 50 мм ( $pF > 4,0$ ) на этой территории составляет 30%, а благоприятных лет с запасами больше 100 мм ( $pF < 3,8$ ) — всего 10% (табл. 102).

Таблица 102

**Повторяемость лет (%) с различными запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы в период трубка—цветение яровой пшеницы**

Средне-многолетние запасы влаги (мм)	Запасы влаги в отдельные годы (мм)				
	0—50	50—100	100—150	150—200	200—250
0—50	90	10	.	.	.
50—100	30	60	10	.	.
100—150		30	50	20	.
150—200		.	30	40	30

В Нижнем Поволжье, на значительной части степных районов Северного Казахстана и в Кулунде в период трубка—цветение средние многолетние запасы составляют меньше 50 мм ( $pF > 4,0$ ). Посевы здесь часто терпят острый недостаток влаги, что сильно сказывается на формировании урожая. Недостаток водоснабжения имеет место также в северной части степной зоны Сибири и на засоленных почвах лесостепной зоны, где средние многолетние запасы составляют 50—80 мм ( $pF = 4,0 \div 3,9$ ). В остальной части лесостепной зоны Сибири они удерживаются на уровне 100 мм ( $pF \approx 3,8$ ).

В районах, расположенных севернее линии Калининград—Ливны—Ленинград—Ижевск—Красноуфимск—Тобольск—Барабинск, где механизм капиллярного передвижения обеспечивает достаточную подачу воды, посевы в этот период обычно хорошо обеспечены влагой. Но так как наличие капиллярной влаги в почвах обуславливает плохую аэрацию нижних слоев и тем самым ограничивает проникновение корней вглубь, то в случаях резкого понижения уровня почвенно-грунтовых вод (когда капиллярная кайма уходит из пределов освоенного корневого системой слоя почвы) посевы, быстро использовав запасы маломощного корнеобитаемого слоя, попадают в жесткую зависимость от текущей погоды (выпадения осадков) даже при наличии больших запасов продуктивной влаги в нижних слоях почвы. Особенно жестка эта зависимость на легких почвах вследствие их малой влагоемкости в период глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и отсутствия капиллярного смачивания. В итоге на легких почвах в случае высокого стояния почвенно-грунтовых вод посевы страдают от избытка влаги, в случае низкого стояния, наоборот, в этот требовательный к влаге период посевы нередко страдают от недостатка влаги, особенно на песчаных почвах.

В период формирования зерна яровой пшеницы в районах, расположенных севернее линии Калининград—Ливны—Рязск—Кудымкар—Челябинск—Новосибирск—Барнаул, где среднеголетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы за этот период больше 100 мм ( $pF < 3,8$ ), посевы вполне обеспечены влагой, а в отдельные годы, особенно частые на северо-западе Европейской территории СССР, могут страдать от ее избытка.

Южнее, на территории с запасами влаги в почве 50—100 мм ( $pF \approx 4,0 \div 3,8$ ), условия формирования зерна близки к оптимальным, но в противоположность более северным районам здесь в отдельные годы может ощущаться недостаток влаги.

На самом юге Украины, в восточной части Северного Кавказа, в Нижнем Поволжье и в южной части Среднего Поволжья, а также в степных районах Северного Казахстана и в Кулунде среднеголетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в период формирования зерна меньше 50 мм ( $pF > 4,0$ , рис. 56).

Во всех этих районах со среднеголетними запасами продуктивной влаги в почве в период формирования зерна, меньшими 50 мм, нередко случаи, когда влажность почвы достигает критических значений: условия водоснабжения не обеспечивают нормального налива зерна, вследствие чего резко снижается его абсолютный вес. В отдельные годы здесь запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы становятся меньше 25 мм ( $pF > 4,1$ ), в значительной части почвенного профиля влажность не превышает влажности устойчивого завядания, а в самых верхних слоях бывает даже ниже максимальной гигроскопичности ( $pF > 4,2$ ), т. е. достигает значений, вызывающих отмирание корневой системы. В этих районах обычно растение может добывать лишь влагу, удерживаемую почвой большими силами из глубоких слоев почвы, а потому получает ее в крайне ограниченных количествах. В итоге наблюдаются засухи, запалы и захваты зерна, резко снижающие урожаи. В тех случаях, когда такое сильное просыхание верхних слоев наблюдается на фоне непромоченных талыми водами нижних слоев почвы, может иметь место гибель всего урожая. Повторяемость таких неблагоприятных лет — здесь нередкое явление. Повторяемость лет с запасами влаги в метровом слое почвы, меньшими 50 мм, на этой территории составляет 80%, с запасами больше 100 мм — всего 5% (табл. 103). На всей этой территории большое значение имеют выпадающие в период налива зерна осадки.

На условия водоснабжения высеваемых по зяби ранних яровых, как уже говорилось, влияют сроки и способы обработки почвы. В описанных выше засушливых районах они могут способствовать значительному накоплению и сбережению влаги в почве.

Сравнение динамики запасов продуктивной влаги и влагообеспеченности озимых и яровых культур на территории СССР приводит к следующему заключению.

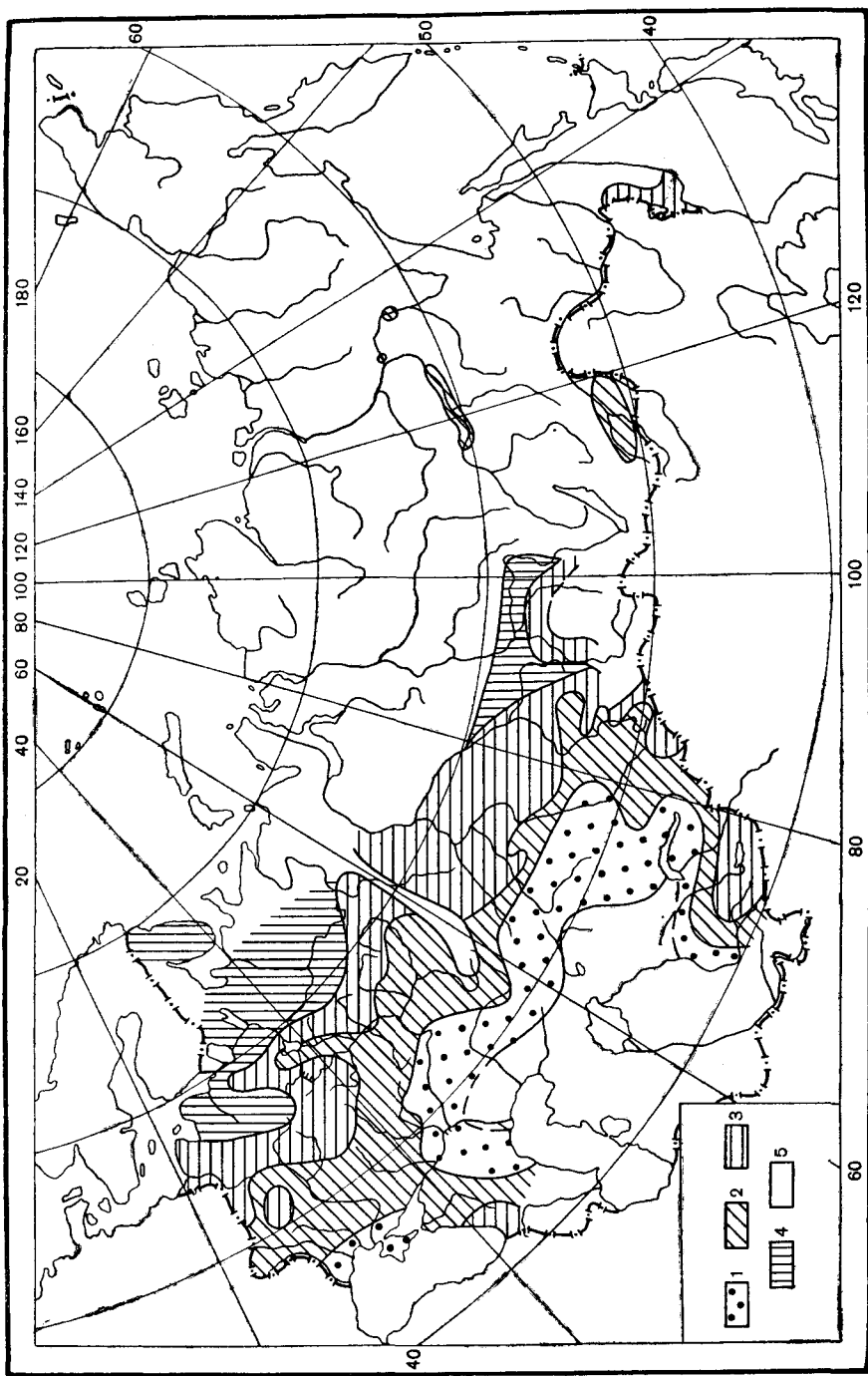


Рис. 56. Среднемноголетние запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы в период налива зерна яровой пшеницы.  
 1 — менее 50 мм, 2 — 50—100 мм, 3 — 100—150 мм, 4 — 150—200 мм, 5 — районы горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы.

Таблица 103

**Повторяемость лет (%) с различными запасами продуктивной влаги  
в метровом слое почвы в период формирования зерна  
яровой пшеницы**

Средне- многолетние запасы влаги (мм)	Запасы влаги в отдельные годы (мм)					
	0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300
0—50	80	10	10			
50—100	20	60	10	10		
100—150		20	60	20		
150—200			20	30	30	20

У озимых культур осенний период вегетативного развития (посев—прекращение вегетации осенью) протекает на значительной части территории СССР при недостаточном водоснабжении. Период репродуктивного развития, особенно закладки колоса, проходит обычно в благоприятных, а на большей части СССР в оптимальных условиях. В период формирования зерна на основной части Союза условия также благоприятны. В это время недостаточное водоснабжение отмечается лишь в отдельных районах крайнего Юга и Юго-Востока Европейской территории СССР и избыточное — в северо-западных ее районах.

У яровых, наоборот, период вегетативного развития (посев—выход в трубку) протекает при удовлетворительных, а во многих районах — при близких к оптимальным условиям водоснабжения. Но уже ко времени закладки репродуктивных органов яровых выявляются крупные районы недостаточного увлажнения. По мере развития яровых эти районы увеличиваются и недостаточность увлажнения растет. На Юго-Востоке, Северном Кавказе (исключая Кубань), юге Украины, а также в степной зоне Казахстана и Западной Сибири выделяются районы, где захваты и запалы зерна яровой пшеницы — нередкое явление.

Избыточное увлажнение как яровых, так и озимых в период формирования зерна наблюдается на Севере и Северо-Западе Европейской территории СССР и в таежной зоне Сибири. Здесь бывают годы, когда зерно прорастает на корню.

### Агрогидрологические зоны СССР

На основании особенностей динамики запасов продуктивной влаги в отдельных районах СССР и соответствия этих особенностей потребности во влаге зерновых культур на территории СССР могут быть выделены четыре агрогидрологические зоны, которым в соответствии с господствующим типом годового хода запасов продуктивной влаги присвоены наименования: зона обводнения, капиллярного увлажнения, полного весеннего промачивания и слабого весеннего промачивания [31].

**Зона обводнения** охватывает Прибалтику, примыкающую к ней Белоруссию, северные и северо-западные районы Европейской территории СССР и таежные районы Западно-Сибирской равнины (рис. 57). Наличие в почвах этой зоны гравитационной и легкоподвижной капиллярной влаги обеспечивает зерновым культурам не только достаточное, но в некоторые периоды (осень, весна) и избыточное увлажнение. Последнее влечет за собой снижение производительности использования почвенной влаги и нередко служит причиной полегания хлебов. Огромное количество просачивающейся через почву воды обуславливает здесь вынос питательных веществ из корнеобитаемого слоя в грунтовые воды. Господствующий тип годового хода запасов продуктивной влаги в почве этой зоны представлен на рис. 26 (кривая 1). На территории зоны эффективны мероприятия, направленные на регулирование уровня грунтовых вод и освобождение сельскохозяйственных угодий от избытка влаги (осушение, разного рода дренаж и др.).

**Зона капиллярного увлажнения** охватывает территорию, расположенную севернее линии Калининград—Ливны—Кудымкар—Тобольск—Кемерово. Наличие в почвах этой зоны легкоподвижной капиллярной воды обычно обеспечивает большие запасы продуктивной влаги под озимыми и яровыми культурами в течение всего вегетационного периода (см. рис. 26, кривая 2). Осенью и весной почва бывает избыточно увлажнена, в связи с чем в это время года посевы могут страдать от избытка влаги. Вследствие насыщенности влагой и, следовательно, плохой аэрации нижних слоев почвы здесь, как и в зоне обводнения, корневая система осваивает лишь верхние слои почвы. Поэтому в сухие годы в течение 2—2,5 летних месяцев глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и отсутствия верховодок посевы могут страдать от недостатка влаги. При этом чаще страдают яровые, чем озимые культуры.

В связи с избыточным увлажнением в ранневесенний и позднеосенний периоды на части территории этой зоны эффективны мероприятия по регулированию уровня почвенно-грунтовых вод и верховодок. Агротехнические мероприятия, направленные на восстановление использованных предшествующей культурой запасов влаги, здесь даже в годы с небольшим количеством осадков в осенний период малоэффективны, так как запасы влаги обычно восстанавливаются путем капиллярного подтока воды снизу, наблюдаемого здесь в большую часть года (в течение 9—10 месяцев).

**Зона полного весеннего промачивания** простирается на юг от зоны капиллярного увлажнения до линии Черновцы—Харьков—Пермь—Оренбург—Кустанай—Ишим—Мариинск. В этой зоне категория легкоподвижной почвенной влаги отсутствует. Для формирования урожая зерновых культур условия водоснабжения благоприятны: характер изменения запасов продуктивной влаги во времени обычно соответствует потребности в ней растений в отдельные периоды их развития. Но в отдельные годы это соответствие может нарушаться, могут наблюдаться периоды острого недостатка влаги: для озимых лишь в течение осенней вегетации,

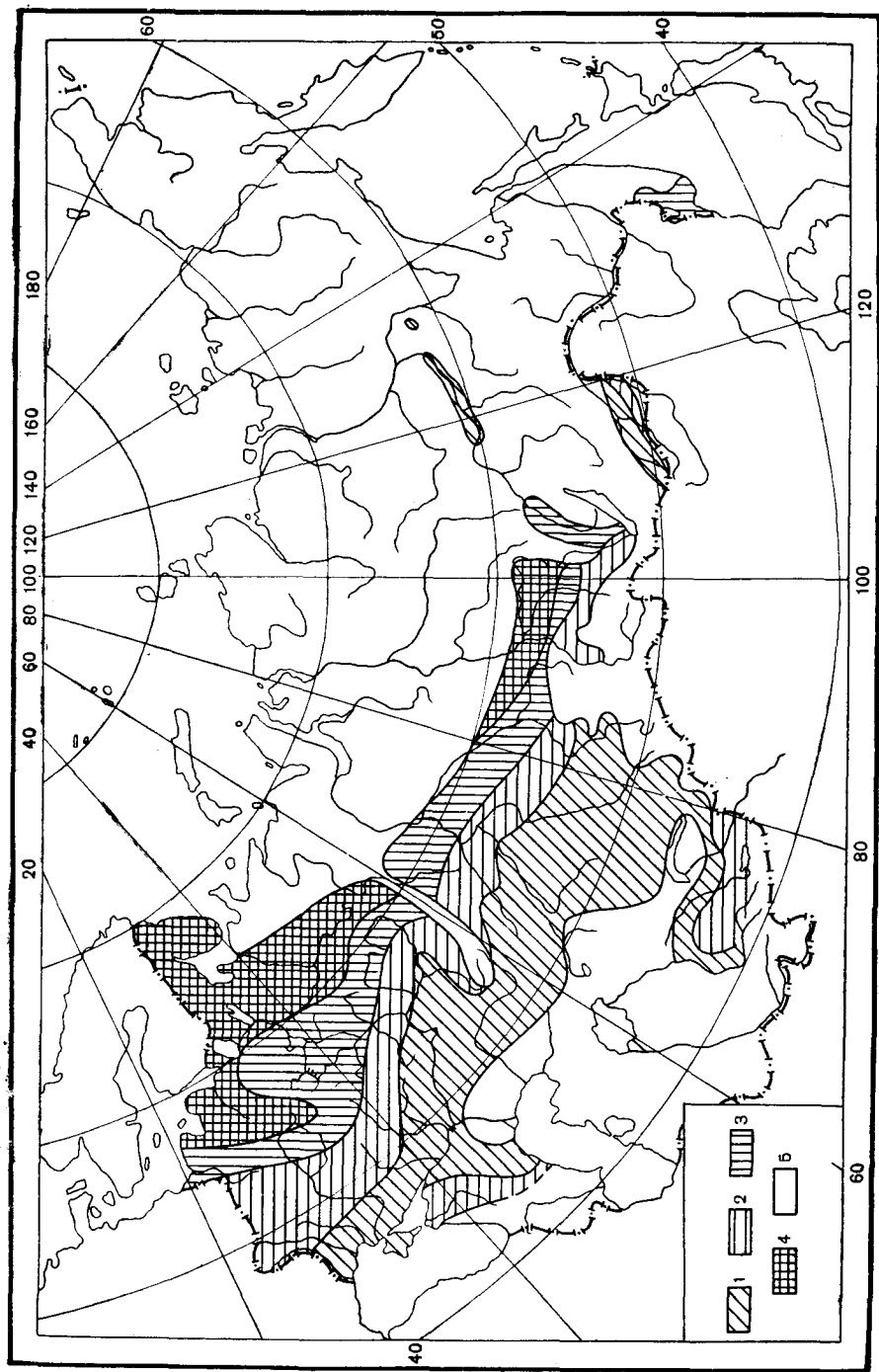


Рис. 57. Агрогидрологические зоны СССР.

1 — зона слабого весеннего промачивания, 2 — зона полного весеннего промачивания, 3 — зона капиллярного промачивания, 4 — зона обводнения, 5 — районы горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы.

для яровых — на протяжении всего вегетационного периода. Господствующий тип динамики запасов продуктивной влаги в этой зоне представлен на рис. 26 (кривая 3).

Агротехнические мероприятия по восстановлению использованных предшествующей культурой запасов влаги (снегозадержание, чистые пары и др.) в этой зоне достаточно эффективны, особенно после сухого лета. Мероприятия по сбережению влаги в теплую часть года всегда эффективны.

**Зона слабого весеннего промачивания** охватывает районы, расположенные к югу и юго-востоку от зоны полного весеннего промачивания. В этой зоне даже весной почвы промачиваются на глубину меньше 1 м. Легкоподвижная почвенная влага здесь имеется лишь ранней весной и во время дождей, притом только в самых верхних слоях почвы. В остальную часть года влага удерживается почвой большими силами ( $pF > 2,7$ ), водоснабжение растений сильно ограничено и периоды недостатка влаги являются обычными. Особенно часто острый недостаток влаги отмечается в период осенней вегетации озимых и в период формирования зерна яровых. Достаточное водоснабжение в течение всего периода вегетации зерновых культур имеет место лишь в отдельные годы. Сухость нижних слоев почвы в зоне слабого весеннего промачивания ограничивает проникновение корней растений в глубокие слои почвы и тем самым снижает возможность использования имеющихся в них питательных веществ.

Господствующий тип годового хода запасов продуктивной влаги в этой зоне представлен на рис. 26 (кривая 4), наиболее резко он выражен в очень засушливых ее районах (кривая 5).

Все мероприятия, направленные на восстановление запасов влаги, израсходованных за период вегетации предшествующей культурой, и сбережение влаги в теплую часть года в этой зоне достигают максимальной эффективности. Эти мероприятия не только увеличивают запасы продуктивной влаги, но благодаря более глубокому промачиванию почв обеспечивают проникновение корней в глубокие слои почв — делают посевы более засухоустойчивыми. Особой эффективности достигают комплексы мероприятий, направленных на накопление, сбережение и использование влаги. Но обеспечить получение из года в год устойчиво высоких урожаев сельскохозяйственных культур может только орошение.

Границы описанных зон в природных условиях очерчены нерезко. Вследствие различий в рельефе, почвах, гидрогеологических и микроклиматических условиях, а также вследствие деятельности человека (мелиорация и агротехника) зоны обводнения и капиллярного насыщения тесно переплетаются между собой. Районы капиллярного насыщения глубокими языками и пятнами заходят на территорию, где господствует тип полного и даже слабого весеннего промачивания, приурочиваясь к понижениям и западинам с близким стоянием уровня грунтовых вод. Еще теснее переплетается зона полного весеннего промачивания с зоной слабого промачивания почв весной.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллаев А. К., Карнаухова Н. Н., Муминов Ф. А. Расчет ожидаемых запасов продуктивной влаги под хлопчатником в районах хлопкосеяния Средней Азии. — Тр. САНИГМИ, 1967, вып. 28 (43).
2. Аболин Г. И. Физиология формирования зерна и засухоустойчивость. — «Селекция и семеноводство», 1948, № 2.
3. Абрамова М. М. Опыты по изучению капиллярного передвижения воды. — «Почвоведение», 1948, № 1.
4. Абрамова М. М. Опыты по изучению испарения влаги из почвы. — Тр. Ин-та леса АН СССР, 1958, т. 38.
5. Алексеев А. М. Водный режим растений и влияние на него засухи. Казань, Татгосиздат, 1948.
6. Аллер М. Эффективный потенциал воды при высыхании почвы. — В кн.: «Термодинамика» Л., Гидрометеиздат, 1966.
7. Алпатыев А. М. Влагооборот культурных растений. Л., Гидрометеиздат, 1954.
8. Алпатыев А. М. Влагообороты в природе и их преобразования. Л., Гидрометеиздат, 1969.
9. Алпатыев А. М., Бейлис В. М. О географическом размещении занятых паров. — В кн.: «Агроклиматические условия и новые резервы в сельском хозяйстве». Л., Гидрометеиздат, 1961.
10. Анджапаридзе И. В. Повышение урожайности кукурузы регулированием влажности почвы поливами. — Тр. Ин-та полеводства, 1948, т. 3.
11. Андрианов П. И. Связанная вода почв и грунтов. — Тр. Ин-та мерзловедения, 1946, т. 3.
12. Андрианова Л. В. Способ расчета запасов влаги на посевах льна-долгунца в основной зоне возделывания. — Тр. ГМЦ, 1968, вып. 24.
13. Астапов С. В., Долгов С. И. Руководство по почвенно-мелиоративным исследованиям в степных и лесостепных районах европейской части СССР, ч. 2. Методы мелиоративной характеристики почв. Изд. МСХ СССР, М., 1953.
14. Астапов С. В. Мелиоративное почвоведение. Практикум 2. Изд. переработанное, дополненное. М., Сельхозгиз, 1958.
15. Баженов С. Засуха 1929 г. и влияние ее на урожай хлебов и трав на Бузулукской опытной станции. Бузулук, изд. Бузулукского райисполкома, 1929.
16. Баженов С. Отчет за 1927, 1928, 1929 гг. Бузулукской сельскохозяйственной опытной станции. Бузулук, изд. Бузулукского райисполкома, 1930.
17. Бараев А. И. Обработка паров. Алма-Ата, изд. МСХ КазССР, 1958.
18. Белухина Г. В. Фитоклимат яровой пшеницы в условиях орошения на Европейской территории СССР. — Тр. ЦИП, 1957, вып. 53.
19. Богданов П. Н. Корневая система и урожай яровой пшеницы. — В кн.: «Научный отчет ин-та зернового хозяйства Юго-Востока СССР за 1943—1945 гг.», Саратов, 1947.
20. Бойко В. С. Динамика режима питательных веществ при орошении темнокаштановых почв Кулундинской степи. — Тр. Биолог. ин-та СО АН СССР, 1959, вып. 4.
21. Болт Г., Фриссел М. Термодинамика воды в почве. — В кн.: «Термодинамика» Л., Гидрометеиздат, 1966.
22. Большаков А. Ф. Водный режим богарных почв Узбекистана. — Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, 1950, т. 32.

23. Большаков А. Ф. Водный режим мощных черноземов в период засухи.— Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, 1950, т. 32.
24. Большаков А. Ф. Водный режим мощных черноземов Средне-Русской возвышенности. М., Изд-во АН СССР, 1961.
25. Бородин А. Влияние орошения на урожай кукурузы и однолетних трав.— «Селекция и семеноводство», 1936, № 10.
26. Будыко М. И. и др. Изменения климата в связи с планом преобразования природы засушливых районов СССР., Л., Гидрометеиздат, 1952.
27. Бурнацкий Д. П. и др. Роль лесных полос в изменении микроклимата.— В кн.: «Полезастное лесоразведение». М., Сельхозгиз, 1955.
28. Бялый А. М. Водный режим почв в полях травопольного севооборота.— В кн.: «Научный отчет Ин-та зернового хозяйства Юго-Востока СССР за 1943—1945 гг.». Саратов, 1947.
29. Бялый А. М. Водный режим в лесу, лесополосе и межполосном пространстве.— В кн.: «Тезисы докладов на научно-технической конференции по теории защитного лесоразведения в Волгограде». Волгоград, 1960.
30. Вериго С. А. Об учете влаги в почве.— «Метеорология и гидрология», 1936, № 12.
31. Вериго С. А. Динамика запасов почвенной влаги на территории СССР.— Тр. по сельскохозяйственной метеорологии, 1948, т. 26.
32. Вериго С. А. Запасы почвенной влаги на территории СССР.— Тр. юбилейной сессии АН СССР, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева, 1949.
33. Вериго С. А. Особенность методики наблюдений над влажностью почвы в условиях поливных хозяйств.— Тр. ЦИП, 1954, вып. 33(6).
34. Вериго С. А., Мастинская С. Б., Разумова Л. А. Влагообеспеченность яровой пшеницы в районах освоения целинных и залежных земель.— «Метеорология и гидрология», 1955, № 5.
35. Вериго С. А., Разумова Л. А. Агрометеорологические условия возделывания яровой пшеницы в Западной Сибири.— В кн.: «Агроклиматические условия освоения целинных и залежных земель». Л., Гидрометеиздат, 1954.
36. Вериго С. А., Разумова Л. А. Влагообеспеченность яровой пшеницы.— В кн.: «Агроклиматические и водные ресурсы районов освоения целинных и залежных земель». Л., Гидрометеиздат, 1955.
37. Вериго С. А. Методика составления прогноза запасов продуктивной влаги в почве и оценка влагообеспеченности зерновых культур.— В кн.: «Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий». Л., Гидрометеиздат, 1957.
38. Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. Л., Гидрометеиздат, 1963.
39. Вильямс В. Р. Почвоведение. Земледелие с основами почвоведения. М., Сельхозгиз, 1947.
40. Вознесенский А. С. Применение тензиометров при почвенно-эрозийных исследованиях.— Тр. Ин-та почвоведения АН ГрузССР, 1950, т. 4.
41. Вознесенский А. С., Дуниамаян С. Х. Применение тензиометров для оперативной корректировки плановых поливов.— Тр. ГрузНИИГиМ, 1951, вып. 2.
42. Вознесенский А. С., Абрамов Н. И. Почвенный влагомер для определения влажности, дифференциальной скважности и капиллярной водопроводимости почв.— Тр. ГрузНИИГиМ, 1956, вып. 4.
43. Воробьев А. М. Подготовка и проведение поливов сельскохозяйственных культур при гнездовом способе посевов. Гродно, 1955.
44. Высоцкий Г. Н. Режим почвенной влажности, грунтовых вод и солей в степных и лесостепных почво-грунтах.— В кн.: «Тр. I Всесоюзного гидрологического съезда». Вып. 6. М.—Л., Госгеолиздат, 1933.
45. Высоцкий Г. Н. Избранные труды. М., Сельхозгиз, 1960.
46. Гарднер В. Р. Соотношения почвенной воды в сухих и засушливых условиях.— В кн.: «Растение и вода», Л., Гидрометеиздат, 1967.

47. Генкель П. А. Устойчивость растений к засухе и пути ее повышения. — Тр. ин-та физиологии растений им. К. А. Тимирязева, 1946, т. 5, вып. 1.
48. Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л., Гидрометеиздат, 1969.
49. Голубева Л. А. Снегоотложение у лесных полос различной конструкции. — «Социалистическое зерновое хозяйство», 1940, № 5.
50. Голубева Л. А. Влияние лесных полос различной конструкции на микроклимат и снегоотложение. — В кн.: «Итоги научно-исследовательских работ в области агролесомелиорации за 1939 г.». М., изд. ВНИАЛМИ, 1941.
51. Горшенин И. М. Водный режим почво-грунта в системе лесных полос. — В кн.: «Тезисы докладов на научно-технической конференции по теории защитного лесоразведения в Волгограде». Изд. ВНИАЛМИ, Волгоград, 1960.
52. Гудков И. Н. Засухи и процессы цветения у кукурузы. — «Селекция и семеноводство», 1939, № 2—3.
53. Давид Р. Э. Влажный дефицит как мерило транспирации культурных растений. — «Социалистическое зерновое хозяйство», 1934, № 5.
54. Давитая Ф. Ф. О густоте метеорологической сети для целей земледелия. — «Метеорология и гидрология», 1946, № 5.
55. Данилин А. И. Измерение влажности почв при помощи гамма-лучей. — «Почвоведение», 1955, № 7.
56. Данилин А. И. Измерение влажности почвы по омическому сопротивлению электродов в стекловолокне, помещенных в почву. — «Метеорология и гидрология», 1956, № 7.
57. Данилин А. И. Омический метод измерения влажности почвы с применением угольных электродов в стекловолокне. — Тр. НИИГМП, 1957, вып. 5.
58. Данилин А. И., Разумова Л. А. Производство наблюдений над влажностью почвы при помощи влагомера с омическими угольными датчиками (ИВП-53). — Методические указания, вып. 30, М., 1956.
59. Делинкайтес С. Влажность разных видов пара в 1912 г. Самара, 1913.
60. Денисов П. С. Накопление и сохранение влаги в почве засушливых районов Сибири. — В кн.: «Вопросы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР», т. 2, Саратов, 1959.
61. Денисов Г. А. Паропропажные севообороты и система агротехнических мероприятий по борьбе с засухой в Саратовской области. — В кн.: «Вопросы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР» Т. 1, Саратов, 1959.
62. Дерягин Б. В. Упругие свойства тонких слоев воды. — «Физическая химия», 1932, т. 3.
63. Докучаев В. В. Наши степи прежде и теперь. СПб, 1892.
64. Долгов С. И., Рыжов С. Н. К вопросу об определении максимальной высоты капиллярного поднятия воды в почво-грунтах. — Тр. ВИУА, 1933, вып. 2.
65. Долгов С. И. Соотношение между электропроводимостью почв и содержанием в ней воды. — «Физика почв», 1937, вып. 18.
66. Долгов С. И. О формах и состояниях почвенной влаги. — «Почвоведение», 1946, № 7.
67. Долгов С. И. Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений. М.—Л., Изд. АН СССР, 1948.
68. Дроздов Н. А. Обзор главнейших результатов научно-исследовательских работ с кукурузой на Северном Кавказе. Вып. 13. Днепропетровск, 1931.
69. Думанский А. В., Думанская А. П. Связанная вода в почвах. — Изв. ГосНИИ коллоидной химии, 1934, вып. 2.
70. Думанский А. В., Клейман О. В. Применение интерферометра при определении связанной воды. — «Коллоидальный журнал», 1936, т. 3, вып. 8.
71. Дятлова Т. Р. Водный режим в занятых и черных парах. — «Московский колхозник», 1958, № 6.
72. Заблуда Г. В. Влияние условий роста и развития на морфогенез и продуктивность хлебных злаков. — «Агробиология», 1948, № 1.
73. Зайцева А. А. Яровая пшеница в остро засушливых районах. М., Сельхозгиз, 1957.

74. Захаров В. В. Мероприятия, улучшающие распределение снега и талых вод на полях, защищенных лесными полосами. — Сб. работ Поволжской агрометеорологической опытной станции, 1960, вып. 4.
75. Измайльский А. А. Влажность почв и грунтовые воды. 1894.
76. Инструкция по определению влажности почвы. Сост. С. А. Веряго. М., изд. ЦУ ЕГМС, 1935.
77. Инструкция для производства агрометеорологических наблюдений. М., Гидрометеоздат, 1939.
78. Итоги работ Безенчукской опытной станции за 1937 г. Куйбышев, 1937.
79. Кабанов П. Г. О поверхностном стоке талых вод в Поволжье. — «Социалистическое зерновое хозяйство», 1938, № 2.
80. Кабанов П. Г. Снежные мелиорации. — «Социалистическое зерновое хозяйство», 1940, № 6.
81. Кабанов П. Г., Войцман К. С. Влияние погоды весны на таяние снега и размеры стока. — «Социалистическое зерновое хозяйство», 1940, № 5.
82. Кабанов П. Г. О дифференцированном подходе к применению агротехники в районах Поволжья. — В кн.: «Агрометеорологические аспекты повышения продуктивности земледелия». Л., Гидрометеоздат, 1970.
83. Карнос Г. В., Чучко Н. И. Глубокая безотвальная вспашка — перспективный прием обработки почвы. — «Земледелие», 1956, № 5.
84. Качинский Н. А. Корневая система растений в почвах подзолистого типа. — Тр. Московской областной опытной станции, 1925, вып. 7.
85. Качинский Н. А. О влажности почвы и методах ее изучения. Л., 1930.
86. Качинский Н. А. Опыт агролесомелиоративной характеристики почв. М., изд. Сов. секции МАП, 1934.
87. Качинский Н. А. О структуре почвы, некоторых водных ее свойствах и дифференциальной порозности. — «Почвоведение», 1947, № 6.
88. Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, Изд-во АН СССР, М., 1958.
89. Качинский Н. А. Физика почвы. М., «Высшая школа», 1965.
90. Кедрованский В. Н., Стернзат М. С. Метеорологические приборы. Л., Гидрометеоздат, 1953.
91. Кин Б. А. Физические свойства почвы. М.—Л., 1933. Гостехиздат.
92. Клейман Э. Я., Божевинов Н. С. Метод и прибор для определения влажности и температуры почвы и других дисперсных тел. — Тр. НИИГМП, 1953, вып. 3.
93. Колосков П. И. Агроклиматическое районирование Казахстана. М., Изд-во АН СССР, 1947.
94. Колесник И. А. Обработка грунту в сівозмінах. Заходи по збільшенню виробництва с-г. продукції на 100 га землі в південному степу УРСР. Київ, видавництво с-г. літ-ри УРСР, 1957.
95. Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М., Гидрометеоздат, 1959.
96. Константинов А. Р. Вопросы теории режима орошения. — Тр. Укр. НИГМИ, 1966, вып. 57.
97. Конторщиков А. С. Агрометеорологическая оценка условий формирования сельскохозяйственных культур на примере яровой пшеницы. — Тр. ЦИП, 1957, вып. 53.
98. Конторщиков А. С. Агрометеорологическая оценка и прогноз условий формирования урожая пшеницы при оперативном обслуживании сельского хозяйства. — Тр. ЦИП, 1958, вып. 72.
99. Конторщикова О. М. Оценка влагообеспеченности посевов сахарной свеклы. — В кн.: «Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий». Л., Гидрометеоздат, 1957.
100. Константинов П. Н. Сельскохозяйственная ценность атмосферных осадков в районе Краснокутской с.-х. опытной станции. — «Журнал опытной агрономии Юго-Востока», 1927, т. 4, вып. 2.

101. Корнев В. Г. Всасывающая сила почвы. — «Журнал опытной агрономии», 1923, т. 23.
102. Корнев В. Г. Прибор для измерения всасывающей силы почвы. — «Опытно-мелиоративный вестник», 1929, вып. 2—3.
103. Коссович П. С. Водные свойства почв. — «Журнал опытной агрономии», 1904, т. 5.
104. Костычев П. А. О борьбе с засухами в черноземной области посредством обработки полей и накопления на них снега. СПб., 1899.
105. Костычев С. П. Физиология растений, изд. 3-е. т. I, М., Сельхозгиз, 1937.
106. Красовская И. В. Корневая система яровой пшеницы и рост ее в зависимости от внешних условий. — В кн.: «Научный отчет Ин-та зернового хозяйства Юго-Востока СССР за 1943—1945 гг.» Саратов, 1947.
107. Краткие итоги зонального изучения эффективности удобрений в географической сети опытов (1958—1962 гг.) М., изд. «Колос», 1965.
108. Крафтс А., Карриер Г., Стокинг К. Вода и ее значение в жизни растений. Изд-во иностр. лит-ры, 1951.
109. Кружилин А. С. Физиология орошаемых полевых культур. М., Сельхозгиз, 1944.
110. Кулешов Н. И. Обзор работ по кукурузе кафедры растениеводства за 1945—1954 гг. — Зап. ХСХИ, 1955, т. 6 (48).
111. Кулик М. С. Районирование территории УССР по степени засушливости. — В кн.: «Тр. конференции по проблеме борьбы с засухой в южных районах Украинской ССР. Т. 1. М., Изд-во АН УССР, 1950.
112. Кулик М. С. Оценка засушливых явлений. — В кн.: «Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий». Л., Гидрометеиздат, 1957.
113. Кулик М. С. Погода и минеральные удобрения. Л., Гидрометеиздат, 1966.
114. Куперман Ф. М. Биологические основы культуры пшеницы, вып. 1, 2. М., Изд-во МГУ, 1950, 1953.
115. Куперман Ф. М., Лучшев А. А., Шульгин А. М. Некоторые закономерности развития и роста кукурузы в новых районах ее возделывания. — Изв. АН СССР, сер. биол., 1956, № 4.
116. Лебедев А. Ф. Роль парообразной воды в режиме почвенных и грунтовых вод. — Тр. по с.-х. метеорологии, 1913, вып. 12.
117. Лебедев А. Ф. Передвижение воды в почвах и грунтах. — Изв. Донского с.-х. ин-та, 1919, т. 3.
118. Лебедев А. Ф. Определение максимальной влажности посредством центрифуги. — «Почвоведение», 1927, № 4.
119. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. М.—Л., изд-во АН СССР, 1936.
120. Лисицин П. И. К биологии русского клевера. М., Сельхозгиз, 1947.
121. Логинов Б. И. Влияние молодых защитных полос на повышение урожая сельскохозяйственных культур. — Научн. тр. УкрСХА, 1956, т. 8.
122. Логинов Б. И. Опыт полезащитного лесоразведения в СССР. — В кн.: «Вопросы лесоведения и лесоводства». Докл. на V Всемирном конгрессе. Изд. АН СССР, 1960.
123. Лорх А. Г. Динамика накопления урожая картофеля. М., Сельхозгиз, 1948.
124. Лукина Н. В. Агрометеорологические условия произрастания дуба при гнездовом способе выращивания в Заволжье. — Тр. ЦИП, 1954, вып. 33 (60).
125. Лыков А. В. Теория сушки. М.—Л., Госэнергоиздат, 1950.
126. Любомудрова С. В., Мещанинова Н. Б. Влияние водного режима почвы на скорость развития кукурузы. Тр. ЦИП, 1961, вып. 101.
127. Максимов Н. А. Физиологические основы засухоустойчивости растений. Л., 1925.
128. Максимов Н. А. Развитие учения о водном режиме и засухоустойчивости растений от Тимирязева до наших дней. Изд-во АН СССР, 1944.
129. Максимов Н. А. Краткий курс физиологии растений. М., Сельхозгиз, 1948.
130. Максимов Н. А., Комизерко С. А. Влияние влажности почвы на рост и физиологические процессы у растений. — В кн.: «Сборник памяти академика Прянишникова». М.—Л., Изд. АН СССР, 1950.

131. **Малянов П. А.** Передвижение капиллярно-подвешенной воды в почве. — Уч. зап. Саратовского ГУ, 1940, т. 15, вып. 1.
132. **Мастинская С. Б.** Особенности расходования почвенной влаги многолетними травами. — Информационный сборник, 1951, № 1.
133. **Мастинская С. Б.** Режим влажности почвы весной в условиях полевых лесоразведения в Заволжье. — «Метеорология и гидрология», 1953, № 3.
134. **Мастинская С. Б.** Режим влажности почвы основных полей севооборота в условиях полевых лесоразведения в Заволжье. — Тр. ЦИП, 1954, вып. 33(60).
135. **Мастинская С. Б.** Составление прогноза запасов продуктивной влаги в условиях полевых лесоразведения в Заволжье. — Тр. ЦИП, 1954, тодических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий». Л., Гидрометеиздат, 1957.
136. **Мастинская С. Б.** К уточнению методики определения влажности почвы в различных почвенно-климатических зонах. — Тр. ЦИП, 1959, вып. 88.
137. **Мастинская С. Б., Мещанинова Н. Б.** Агрогидрологическая эффективность орошения зерновых культур на Юго-Востоке Европейской территории СССР. — Тр. ЦИП, 1957, вып. 53.
138. **Матякин Г. И.** Лесные полевые защитные полосы и микроклимат. М., Географгиз, 1952.
139. **Матякин Г. И.** Полевое лесоразведение в районах целинных и залежных земель. — В кн.: «Вопросы земледелия и борьба с эрозией почвы в степных и лесостепных районах СССР». Т. 2, Саратов, 1959.
140. **Матякин Г. И., Бродихина Л. И., Соколов А. А.** Агролесомелиоративные мероприятия по борьбе с засухой, суховеями и пыльными бурями в районах Западной Сибири и Северного Казахстана. — В кн.: «Научный отчет за 1957 г. ВНИАЛМИ». Волгоград, 1960.
141. Методические указания по определению агрогидрологических свойств почвы в целях учета доступности для растений влаги. Сост. Е. С. Павлова, под ред. С. А. Вериги М., изд. ГУГМС, 1936.
142. **Мещанинова Н. Б.** Агрогидрологическая эффективность орошения зерновых культур на Юго-Востоке Европейской территории СССР. — Тр. ЦИП, 1963, вып. 53.
143. **Мещанинова Н. Б.** Агрометеорологическое обоснование орошения зерновых культур. Л., Гидрометеиздат, 1971.
144. **Милторп Ф. Л.** Поступление и расход воды в сухих и засушливых зонах. — В кн.: «Растение и вода». Л., Гидрометеиздат, 1967.
145. **Муромцев И. А.** Почвенный гигрометр непрерывного действия. — Тр. Плодоовощного ин-та им. Мичурина, 1950, т. 6.
146. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценка точности наблюдений. Под ред. О. А. Городецкого Л., Гидрометеиздат, 1970.
147. **Назаренко В. И.** Орошаемое земледелие в США. — «Гидротехника и мелиорация», 1965, № 1.
148. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 11. Л., Гидрометеиздат, 1963.
149. Научные отчеты Красноярской сельскохозяйственной опытной станции. Энгельс, Немгосиздат, 1935.
150. **Небольсин С. И., Надеев П. П.** Элементарный поверхностный сток. М.—Л., Гидрометеиздат, 1937.
151. **Нерасов П. А.** Водный режим почвы. М., 1924.
152. **Нерсесова З. А.** Фазовый состав воды в грунтах при замерзании и оттаивании. — В кн.: «Материалы по исследованию мерзлых грунтов». Сб. 1. М., 1953.
153. **Нерсесова З. А.** О таянии льда в грунтах при отрицательных температурах. — ДАН СССР, 1953, вып. 79, № 3.
154. **Низеньков Н. П.** Электрометрический метод определения влажности почвы. — В кн.: «Работы по селекции и семеноводству». Киев—Харьков, Сельхозиздат УССР, 1947.

155. Николайчук Л. Н., Янченко К. В. Урожай и качество зеленой массы кукурузы, подсолнечника и негритянского проса в различные фазы и периоды развития. — Уч. зап. Красноярского ГПИ, 1956, т. 5.
156. Носатовский А. И. Пшеница. М., Сельхозгиз, 1950.
157. Оболенский В. Н. Метеорология. Л.—М., Гидрометеиздат, 1939.
158. Обухов В. М. Урожайность и метеорологические факторы. М., Госпланиздат, 1949.
159. Орлов Б. П. К вопросу о распределении температуры и влажности воздуха в слоях, прилегающих к поверхности песка. — «Метеорологический вестник», 1924, № 34.
160. Орлов Б. П. К изучению экологических условий в юго-восточной части Закаспийских Каракумов. — Тр. по прикладной ботанике и селекции, 1928, т. 19, вып. 4.
161. Оценка агроклиматических условий сельскохозяйственных полей. Под ред. В. В. Синельщикова. 1961.
162. Пенман Х. Л. Растения и влага. Пер. с англ. под ред. А. М. Алпатьева. Л., Гидрометеиздат, 1968.
163. Петин Н. С., Бровцина В. Л., Прусакова Л. Д. Формирование зачаточного колоса яровой пшеницы в различных условиях водоснабжения и питания. — В кн.: «Орошение сельскохозяйственных культур в Центрально-Черноземной полосе РСФСР». Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1952.
164. Плешко С. И., Литвинов В. Н. Зависимость урожая кукурузы от площади питания при квадратно-гнездовом посеве. — ДАН Тадж.ССР, 1956, № 18.
165. Пономарев Б. П. Оценка агрометеорологических условий произрастания яровой пшеницы в период формирования зерна. — Тр. ЦИП, 1959, вып. 88.
166. Попов В. Г. Почвенная влага и методы ее изучения. — Тр. Млеевской садово-огородной опытной станции, 1928, № 16.
167. Попов Л. В. Методы определения влажности почвы. — Тр. Восточно-Сибирского филиала АН СССР, сер. биол., 1960, вып. 31.
168. Поповская О. М. Методика оценки агрометеорологических условий произрастания картофеля в центральных областях Европейской территории СССР. — В кн.: «Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий». Л., Гидрометеиздат, 1957.
169. Преображенская М. В. Результаты применения гамма-излучения для наблюдений за динамикой запасов влаги в почве в совхозе Пахтаарал. — «Почвоведение», 1959, № 10.
170. Процеров А. В., Карасев Н. К. Об исчислении коэффициентов завядания по почвенным константам. — «Метеорология и гидрология», 1939, № 12.
171. Процеров А. В. Характеристика засушливости вегетационного периода сельскохозяйственных культур на территории орошения Куйбышевского гидроузла. — Тр. ЦИП, 1953, вып. 29(56).
172. Прянишников Д. Н. Картофель. М., Сельхозгиз, 1922.
173. Разумова Л. А. Основные итоги агрогидрологических исследований гидрометслужбы. — Тр. ЦИП, 1949, вып. 18 (45).
174. Разумова Л. А. Изменение запасов почвенной влаги в зимний период. — «Метеорология и гидрология», 1950, № 1.
175. Разумова Л. А. Миграция влаги в почве по данным лабораторных опытов. — Информационный сб., 1951, № 1.
176. Разумова Л. А. Агрометеорологические условия гибели дубков. — Тр. ЦИП, 1957, вып. 53.
177. Разумова Л. А. Особенности засух в острозасушливых районах СССР и учет климатических ресурсов при разработке приемов земледелия. — В кн.: «Вопросы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР». Т. 2, Саратов, 1959.
178. Разумова Л. А. Изменение агрометеорологических условий под влиянием полезащитного лесоразведения. — Тр. ЦИП, 1963, вып. 131.
179. Разумова Л. А. Пространственная изменчивость и способы учета влажности почвы на орошаемых полях. — Тр. ЦИП, 1965, вып. 145.

180. Разумова Л. А. Влияние глубины стояния грунтовых вод на влажность почвы и формирование урожаев сельскохозяйственных культур при орошении. — Тр. ГМЦ СССР, 1968, вып. 24.
181. Разумова Л. А., Вериго С. А., Мاستинская С. Б. Руководство к составлению прогноза запасов продуктивной влаги в почве. — В кн.: «Методические указания». Вып. 17, М.—Л., Гидрометеониздат, 1951.
182. Разумова Л. А., Мельник Ю. С. Условия водоснабжения яровой пшеницы при основных способах ее возделывания в степных районах Казахстана. — «Метеорология и гидрология», 1957, № 3.
183. Разумова Л. А. и др. Условия водоснабжения зерновых культур в степных районах северной половины Казахстана и в Кулунде. М., Гидрометеониздат, 1960.
184. Разумова Л. А., Мещанинова Н. Б. Реакция зерновых культур на засуху и суховей и районы наибольшей эффективности орошения. — Тр. ГМЦ, 1967, вып. 9.
185. Разумова Л. А., Мещанинова Н. Б. Метод агрометеорологического обслуживания орошаемого земледелия при возделывании зерновых культур. М., Гидрометеониздат, 1969.
186. Роде А. А. Водный режим почв богарной зоны Узбекистана. — Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, 1947, т. 25.
187. Роде А. А. Режим почвенно-грунтовых вод подзолистых, подзолисто-болотных почв. — Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, 1950, т. 32.
188. Роде А. А. К вопросу о природе сил, удерживающих в почве капиллярно-почвенную влагу. — Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, 1959, т. 32.
189. Роде А. А. Почвенная влага. М., Изд-во АН СССР, 1952.
190. Роде А. А. Водный режим почв и его типы. — «Почвоведение», 1956, № 4.
191. Роде А. А. Методы изучения водного режима почв. М., Изд-во АН СССР, 1960.
192. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Л., Гидрометеониздат, 1965.
193. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 2. Л., Гидрометеониздат, 1969.
194. Ротмистров В. Г. Передвижение воды в почвах Одесского опытного поля. — «Журнал опытной агрономии», 1904, т. 5.
195. Ротмистров В. Г. Сущность засухи по данным Одесского опытного поля. Одесса, 1913.
196. Ротмистров В. Г. Корневая система и урожай. — «Советская агрономия», 1939, № 8.
197. Руководство по проверке и обработке материалов по влажности почвы. Сост. Л. А. Разумова. М., Гидрометеониздат, 1940.
198. Руководство по контролю и обработке наблюдений над влажностью и промерзанием почвы. Сост. С. А. Вериго и Л. А. Разумова. Л., Гидрометеониздат, 1955.
199. Руководство по контролю и обработке наблюдений над фазами развития сельскохозяйственных культур. Сост. А. А. ШигOLEV, Л., Гидрометеониздат, 1955.
200. Руководство по определению агрогидрологических свойств почв на гидрометеостанциях. Л., Гидрометеониздат, 1964.
201. Руководство по производству наблюдений над испарением с сельскохозяйственных полей. Ч. 1. Л., Гидрометеониздат, 1947.
202. Руководство по составлению агрометеорологических прогнозов. Л., Гидрометеониздат, 1962.
203. Сабинин Д. А. О корневой системе растений как осмотическом аппарате. — Изв. Биол. ин-та, т. 3, вып. 4. 1925.
204. Сабинин Д. А. О значении корневой системы и жизнедеятельности растений. М.—Л., Изд. АН СССР, 1949.
205. Самуилов Ф. Д., Шагиахметов Г. Ш. Требования кукурузы к условиям внешней среды и возделывание ее в Татарской АССР. Казань, Татаргосиздат, 1956.
206. Слобников С. С. Агротехнические приемы борьбы с засухой и ветровой эрозией в районах освоения целинных и залежных земель. — В кн.: «Во-



- просы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР». Т. 2. Саратов, 1959.
207. Скворцов А. А. Об испарении и обмене в приземном слое атмосферы. — Тр. Ин-та энергетики АН УзССР, 1947, вып. 1.
  208. Скворцов А. А. К вопросу о теплообмене и влагообмене в приземном слое атмосферы. — Тр. САГУ, 1950, вып. 22, кн. 6.
  209. Смирнова С. И., Долгов С. И. Репрезентативность наблюдений над влажностью почвы в условиях предкавказской степной провинции. — Тр. ЦИП, 1961, вып. 107.
  210. Слейтер Р., Макирой И. Практическая микроклиматология. Преимущественно о роли воды в системе почва—растение—атмосфера. М., «Прогресс», 1964.
  211. Соколов Н. С. Обработка почвы в засушливой зоне. — «Земледелие», 1959, № 1.
  212. Соколов Н. С. Проблема обработки почвы в целях повышения влагообеспеченности полей и агротехнические требования к сельскохозяйственным машинам. — В кн.: «Вопросы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР». Т. 1. Саратов, 1959.
  213. Судницин И. И. Закономерности передвижения почвенной влаги. М., «Наука», 1964.
  214. Судницин И. И. Новые методы оценки водно-физических свойств почв и влагообеспеченности леса. М., «Наука», 1966.
  215. Судницин И. И. Количественная модель передвижения воды в системе растение—почва—атмосфера. — «Почвоведение», 1970, № 11.
  216. Самгин М. И. и др. Общее мерзлотоведение. Изд-во АН СССР, 1940.
  217. Тейлор С. А. Основы богарного земледелия в засушливых зонах. — В кн.: «Растение и вода», Л., Гидрометеиздат, 1967.
  218. Тейлор С. А., Слэйтиер Р. О. Предложение по унификации терминологии, применяемой при исследовании поведения воды в системе почва—растение. — В кн.: «Растение и вода». Л., Гидрометеиздат, 1967.
  219. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. М.—Л., Госстройиздат, 1933.
  220. Тимирязев К. А. Земледелие и физиология растений. М., Сельхозгиз, 1929.
  221. Тимирязев К. А. Жизнь растений. М., Сельхозгиз, 1936.
  222. Третьяков Н. Н. Рост и развитие кукурузы при различных сроках сева в условиях Московской области. — Изд. СХА им. Тимирязева, 1956.
  223. Трофимов А. В. Некоторые наблюдения над изменениями почвенного раствора. — «Научно-агрономический журнал», 1924, т. 1, № 9—10.
  224. Трофимов А. В. К познанию невыделимой части почвенного раствора — отрицательная адсорбция почвой электролитов. — «Научно-агрономический журнал», 1925, № 10.
  225. Уланова Е. С. Методика оценки сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий развития и роста озимых в осенний период. — В кн.: «Сборник методических указаний по анализу и прогнозу сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий. Л., Гидрометеиздат, 1957.
  226. Уланова Е. С. Метод долгосрочного агрометеорологического прогноза урожая озимой пшеницы по весенним запасам влаги в почве и числу уцелевших после перезимовки стеблей. — Тр. ЦИП, 1965, вып. 145.
  227. Уланова Е. С. Основы метода долгосрочных агрометеорологических прогнозов средней областной урожайности озимой пшеницы сортов Безостая 1 и Мироновская 808. — Тр. ГМИЦ, 1970, вып. 69.
  228. Уланова Е. С., Цао Ин. Зависимость запасов продуктивной влаги под кукурузой от метеорологических факторов на Украине. — Тр. ЦИП, 1963, вып. 131.
  229. Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л., Гидрометеиздат, 1953.
  230. Фагелер П. Режим катионов воды в минеральных почвах. М., Сельхозгиз, 1938.
  231. Федоров П. Р. Итоги работ опытного поля за 1904—1922 гг. Безенчукская с.-х. опытная станция. Самара, 1923.

232. Федосеев А. П. О перераспределении влаги в почве зимой. — «Метеорология и гидрология», 1941, № 2.
233. Федосеев А. П. Поверхностный слой почвы и испарение влаги. — «Метеорология и гидрология», 1941, № 5.
234. Федосеев А. П. Климат и пастбищные травы Казахстана. Л., Гидрометеоздат, 1964.
235. Федосеев А. П., Белобородова Г. Г. Агроклиматические условия возделывания кукурузы в северной половине Казахстана. — Тр. КазНИИГМ, 1957, вып. 8.
236. Федосов А. В. Механические процессы в грунтах при замерзании в них жидкой фазы. — Тр. Ин-та геологических наук, 1940, вып. 35.
237. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. Л., Гидрометеоздат, 1968.
238. Харченко С. И. Дефициты водопотребления сельскохозяйственных культур и методика расчета режима орошения. В кн.: — «Агрометеорологические аспекты повышения продуктивности земледелия». Л., Гидрометеоздат, 1940.
239. Хэген Р. М., Ваадиа И. Основы орошаемого земледелия. — В кн.: «Растение и вода». Л., Гидрометеоздат, 1967.
240. Цубербиллер Е. А., Белухина Г. В. К методике агрометеорологической оценки суховея в условиях орошаемого земледелия. — Тр. ЦИП, 1956, вып. 47.
241. Цытович Н. А. Теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах. — Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз., 1945, т. 9, № 5—6.
242. Цытович Н. А. Новый принцип механики мерзлых грунтов. — «Мерзлотоведение», 1946, т. 1, № 1.
243. Черноусов А. М., Роктанэн Л. С. Упрощенный почвенный влагомер с воздушным вакуумметром. — «Гидротехника и мелиорация», 1960, № 2.
244. Чирков Ю. И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. Л., Гидрометеоздат, 1969.
245. Чирков Ю. И., Белухина Г. В. Расчет влагозапасов на посевах кукурузы в различных климатических зонах СССР. — Тр. ЦИП, 1963, вып. 131.
246. Шабалин И. Н. К вопросу о поливных режимах сельскохозяйственных культур на орошаемых землях Кулунды. — В кн.: «Освоение целинных и залежных земель в 1954 г.» М., Изд. АН СССР, 1956.
247. Шабалин И. Н. Вопросы орошения сельскохозяйственных культур в Кулундинской степи. — Тр. БИН Западно-Сибирского филиала АН СССР, 1958, вып. 4.
248. Шабалин И. Н. Вопросы водопотребления при орошении яровой пшеницы в Кулундинской степи. — Тр. БИН Западно-Сибирского филиала АН СССР, 1959, вып. 4.
249. ШигOLEв А. А. К изучению связи формирования зерна с метеорологическими факторами. — «Метеорология и гидрология», 1954, № 6.
250. ШигOLEв А. А. Температура как количественный агрометеорологический показатель скорости развития растений и некоторых элементов их продуктивности. — Тр. ЦИП, 1957, вып. 53.
251. ШигOLEв А. А., Пономарев Б. П. О связи числа колосков в колосе яровой пшеницы с агрометеорологическими условиями. — Тр. ЦИП, 1958, вып. 72.
252. Шишков К. Н. Почвенный влагомер и его применение в мелиорации. — «Гидротехника и мелиорация», 1950, № 3.
253. Шишков К. Н., Окушко А. А., Муромцев Н. А. Тензиометры и их применение для определения влажности почвы и сроков полива. — Тр. ИЭМ, 1970, вып. 13.
254. Шоу Б. Физические условия почвы и растение. Изд-во иностр. лит-ра, 1955.
255. Штоккер О. Физиологические и морфологические изменения в растениях, обусловленные недостатком воды. — В кн.: «Растение и вода». Л., Гидрометеоздат, 1967.
256. Шубин В. Ф. О сочетании полезавитных лесных полос с однолетними снегонакопительными кулисами. — В кн.: «Тезисы докладов на научно-

- технической конференции по теории защитного лесоразведения в Волгограде». Волгоград, 1960.
257. Шульгин А. М. Почвенный климат и снегозадержание. М., Изд-во АН СССР, 1954.
  258. Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование. Л., Гидрометеиздат, 1967.
  259. Шурьгин А. П. Опыт применения системы мероприятий по борьбе с засухой на примере колхозов Новоанненского района Волгоградской области. — В кн.: «Вопросы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР». Т. 2. Саратов, 1959.
  260. Щербинин Н. М. Безотвальная глубокая обработка в Целиноградской области. — «Земледелие», 1957, № 8.
  261. Эдлефсен Н. И., Андерсон А. Б. Термодинамика почвенной влаги. В кн.: «Термодинамика». Л., Гидрометеиздат, 1966.
  262. Янович П. Н. Изменить систему земледелия в Кулунде. — «Земледелие», 1957, № 8.
  - 263a. Aitchison G. D. Simplified measurements of soil temperature and of soil moisture. Australian J. Appl. Sci. Melbourne, v. 4, No. 4, 1953.
  - 263b. Aitchison G. D., Butler P. F. A gypsum block moisture meters as instruments for the measurement of tension in soil water. Australian J. Appl. Sci. Melbourne, v. 2, No. 3, 1951.
  264. Aitchison G. D., Butler P. F. and Gurr C. G. Techniques associated with the use of gypsum block soil moisture meters. Australian J. Appl. Sci. Melbourne, v. 2, No. 1, 1951.
  265. Atterberg A. Die Plastizität der Tone. Int. Mitt. Bodenk., 1911.
  266. Atterberg A. Die Konsistenz und die Bindigkeit der Böden. Int. Mitt. Bodenk., 1912.
  267. Baver L. D. Soil physics. Second edition, No. 7, 1948.
  268. Belcher D. J. The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma ray scattering. Highway Res. Spec. Rep. New York, No. 2, 1952.
  269. Botelho da Costa J. W. A critical survey of investigations on the wilting coefficient of soils. J. Agric. Sci., v. 28, L., 1938.
  270. Botelho da Costa J. W. The indirect determination of the wilting coefficient by the freezing point method. J. Agric. Sci., v. 28, L., 1938.
  271. Bouyoucos G. J. Classification and measurement of different forms of water in the soil by means of the dilatometer method. Mich. Exp. St. Techn. Bull. 36, 1917.
  272. Bouyoucos G. J. Relationship between the unfree water and the heat of wetting of soils and its significance. Mich. Exp. St. Techn. Bull. 42, 1918.
  273. Bouyoucos G. J. Heat of wetting of soil dried at different temperatures and the force at which soils absorb water. "SS". 20. B, 1925.
  274. Bouyoucos G. J. The state in which the hygroscopic moisture exists in soil as indicated by the determination with alcohol. "SS", v. 41, No. 13, 1936.
  275. Bouyoucos G. J. A nylon electrical resistance unit for continuous measurements of soil moisture in the field. Soil Sci. Baltimore, v. 67, No. 4, 1949.
  276. Bouyoucos G. J. A practical soil moisture meter as a scientific guide to irrigation practices. Agric. J. Madison (USA), v. 42, No. 2, 1950.
  277. Bouyoucos G. J. The effect of fertilizers on the plaster of paris electrical resistance method for measuring soil moisture in the field. Agric. J. Madison (USA), v. 43, No. 10, 1951.
  278. Bouyoucos G. J. Improvements in the new method of measuring soil moisture in the field. Agric. J. (USA), v. 44, No. 6, 1952.
  279. Bouyoucos G. J. Methods for measuring the moisture content of soil under field conditions. Highway Res. Board Spec. Rep. New York, No. 2, 1952.
  280. Bouyoucos G. J. More durable plaster of paris moisture block. Soil Sci. Baltimore, v. 76, No. 6, 1953.
  281. Bouyoucos G. J. New electrode for plaster of paris moisture block. Soil Sci., Baltimore, v. 78, No. 5, 1954.

282. Bouyoucos G. J. Electrical resistance methods as finally perfected for making continuous measurement of moisture content under field conditions. Mich. Agric. Exper. Station Quart. Bull. Michigan (USA), No. 37, 1954.
283. Bouyoucos G. J. Improved soil moisture meter. Agric. Eng. St. Joseph (USA), v. 37, No. 3, 1956.
284. Bouyoucos G. J. and Grabb G. A. Measurement of soil moisture by the electrical resistance method. Agric. Eng. St. Joseph, (USA), v. 30, No. 12, 1949.
285. Bouyoucos G. J. and McCool M. M. Further studies on the freezing point lowering of soils. Mich. Agric. Exp. St. Techn. Bull. 31, 1916.
286. Bouyoucos G. J. and Mick A. H. Comparison of absorbent materials employed in the electrical resistance method of making a continuous measurement of soil moisture under field conditions. Soil Sci. Soc. America Proc. Madison (USA), No. 5, 1940.
287. Bouyoucos G. J. and Mick A. H. An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions. Michigan Agric. Exper. Station Techn. Bull. Michigan (USA), 1940.
288. Bouyoucos G. J. and Mick A. H. Improvement in the plaster of paris absorption block electrical resistance method for measuring soil moisture under field conditions. Soil Sci. Baltimore, v. 3, No. 6, 1947.
289. Bouyoucos G. J. and Mick A. H. Comparison of electrical resistance units making a continuous measurement of soil moisture under field conditions. Plant Physiol. Lancaster (USA), v. 23, No. 5, 1948.
290. Bouyoucos G. J. and Mick A. H. Fabric absorption unit for continuous measurement of soil moisture in the field. Soil Sci. Baltimore, v. 66, No. 3, 1948.
291. Briggs L. J. Electrical instruments for determining the moisture temperature and soluble salt content of soil. U.S. Dep. Agric. Bur. Soils Bull. New York, No. 15, 1899.
292. Briggs L. J. and Shantz H. L. The wilting coefficient for different plants. U.S. Dep. Agr. Bur. Pl. Ind. Bull. 230, 1912.
293. Briggs L. J. and Shantz H. L. Relative water requirement of plants. J. Agric. Res., v. 3, 1914.
294. Browning G. M. Relation of field capacity to moisture equivalent in soils of West Virginia. Soil Sci., v. 52, No. 6, 1941.
295. Buckingham E. Studies on the movement of soil moisture. U.S. Dept. Agric. Bur. Soils Bull. 38 W, 1907.
296. Carman P. S. Capillary rise and capillary movement of moisture in fine sands. Soil Sci., No. 1, 1941.
297. Colman E. A. The place of electrical soil-moisture meter in hydrological research. Transamerica Geoph. Un. Washington, v. 27, 1946.
298. Colman E. A. and Hendrix T. M. 1949. The fiberglass electrical soilmoisture instrument. Soil Sci., Baltimore, v. 67, 1949.
299. Keen B. A. On moisture relationships in an ideal soil. J. Agric. Sc., v. 14L, 1924.
300. Keen B. A. The physical properties of the soil. London—New York—Toronto, 1931.
301. Kelley O. J. A rapid method of calibrating various instruments for measuring soil moisture in situ. Soil Science. Baltimore, v. 58, No. 5, 1944.
302. Kelley O. J., Hunter A. S., Haise H. R., Hobbs C. R. A comparison of methods of measuring soil moisture under field conditions. Agric. J. Madison (USA), v. 38, No. 9, 1946.
303. Marais P. Soil moisture determined within a minute. Farming in South Africa. Johannesburg, v. 33, No. 6, 1957.
304. Mitscherlich A. E. Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften. Ldw. Jahrb., Bd. 31 B, 1901.
305. Richards L. A. The usefulness of capillarity potential to soil moisture and plant investigations. J. Agric. Res. Washington, v. 37, No. 6, 1928.
306. Richards L. A. Soil moisture tensiometer materials and construction. Soil Sci., Baltimore, v. 53, No. 4, 1942.

307. Richards L. A. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci. Baltimore*, v. 68, No. 1, 1949.
308. Richards L. A. Multiple tensiometer for determining the vertical component of the hydraulic gradient in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison (USA)*, v. 18, No. 1, 1954.
309. Richards L. A. and Gardner W. Tensiometers for measuring the capillary tension soil water. *Agr. J. Madison (USA)*, v. 28, No. 3, 1936.
310. Richards L. A. and Parson R. W. A soil moisture tensiometer with a compact manometer. *Agr. J. Madison (USA)*, v. 31, No. 11, 1939.
311. Richards L. A. and Weaver L. R. The sorption block soil moisture meter and hysteresis effects related to its operation. *Agric. J. Madison (USA)*, v. 35, No. 10, 1943.
312. Richards L. A. and Weaver L. R. Moisture retention by some irrigated soils or related to soil moisture tension. *J. Agric. Res. Washington*, v. 69, No. 2, 1944.
313. Rodewald H. Theorie der Hygroskopizität. *Ldw. Jahrb.*, Bd. 31 B, 1902.
314. Rosenthal R. Apparature for measuring moisture of soil. *Ind. Instr. Patent U.S.A.* 77—73. No. 2 727 099, 1956.
315. Schofield R. K. The pF of the water in soil. *Trans. 3-d Int. Cong. Soil Sci.*, v. 11L, 1935.
316. Schofield R. K. and Costa J. V. The determination of the pF at permanent wilting and the moisture equivalent by the freezing point method. *Trans. Int. Cong. Soil Sci.*, v. 1, 1935.
317. Schofield R. K. Pore-size distribution as revealed by the dependence of suction on moisture content. *Trans. 1-st Commission Int. Soc. Soil Sci.*, vol. A, 1938.
318. Searle S. A. Measuring soil moisture. *Commercial grower*, London, No. 2997, 1953.
319. Sedgley R. H. and Millington R. J. A rapidly equilibrating soil moisture tensiometer. *Soil Sci. Baltimore*, v. 84, No. 3, 1957.
320. Sekera F. Die nutzbare Wassercapazität und die Wasserbeweglichkeit im Boden. *Z.F.P.D.B.* Bd. 22B, 1931.
321. Shaw B. and Baver L. D. An electrothermal method for following changes in the soil in Situ. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison (USA)*, v. 4, No. 1, 1939.
322. Shaw B. and Baver L. D. Heat conductivity as an index of soil moisture. *Agr. J. Madison (USA)*, v. 31, No. 10, 1939.
323. Stewart G. L. and Taylor S. A. Field experience with the neutron scattering method of measuring soil moisture. *Soil Sci. Baltimore*, v. 83, No. 2, 1957.
324. Stoeckeler J. H., Aamodt E. Use of tensiometers in regulating watering in forest nurseries. *Plant Physiol. Lancaster (USA)*, v. 15, 1940.
325. Stoltenberg N. L. and Lauritzen C. W. Structure of Houston Black Clay as reflected by moisture equivalent data. *J. Amer. Soc. Agric.*, No. 11, 1944.
326. Stone J. E., Kirkham D. and Read A. A. Soil moisture meter determination by a portable neutron scattering moisture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, v. 19, No. 4, 1955.
327. Taber. The mechanics of frost heaving. *J. Geology*, v. 38, 1930.
328. Technical Note No. 59. Windbreaks and shelterbelts. *WMO*, Geneva, 1964.
329. Technical Note No. 97. Practical soil moisture problems in agriculture. *WMO*, Geneva, 1968.
330. Veihmeyer F. G. and Hendrickson A. H. Soil moisture of permanent wilting of plants. *Plant Phys.*, v. 3, 1928.
331. Yourker R. E. and Dreibelbes T. B. An improved soil moisture unit for hydrologic studies. *Trans. Amer. Geophys. Un. Washington*, v. 32, 1951.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От издательства . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<i>Глава I.</i> Свойства почвенной влаги . . . . .	7
<i>Глава II.</i> Передвижение влаги в почве . . . . .	17
Механизмы передвижения влаги в почве . . . . .	—
Термодинамические условия передвижения почвенной влаги . . . . .	26
<i>Глава III.</i> Потребление почвенной влаги растением . . . . .	40
Механизм поступления почвенной влаги в растение . . . . .	—
Термодинамические условия передвижения воды в растении . . . . .	43
<i>Глава IV.</i> Агрогидрологические константы . . . . .	49
Доступность почвенной влаги для растений . . . . .	—
Влагоемкость почв . . . . .	60
Потенциал почвенной влаги . . . . .	70
<i>Глава V.</i> Методы измерения почвенной влаги . . . . .	77
Прямой метод определения влажности почвы . . . . .	—
Косвенные методы определения влажности почвы . . . . .	83
Методы обработки и контроля результатов измерения почвенной влаги . . . . .	91
Репрезентативность запасов продуктивной влаги в почве . . . . .	101
<i>Глава VI.</i> Баланс продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы . . . . .	106
Поступление влаги в корнеобитаемый слой почвы . . . . .	107
Расход влаги из корнеобитаемого слоя почвы . . . . .	113
<i>Глава VII.</i> Закономерности формирования запасов продуктивной влаги в почве . . . . .	126
Формирование запасов почвенной влаги в холодную часть года . . . . .	130
Изменение запасов продуктивной влаги в теплую часть года . . . . .	146
Типы годового хода запасов продуктивной влаги в почве . . . . .	168
<i>Глава VIII.</i> Влияние запасов продуктивной влаги на формирование урожаев сельскохозяйственных культур . . . . .	171
Потребность растений во влаге . . . . .	—
Оценка влагообеспеченности сельскохозяйственных культур . . . . .	176
<i>Глава IX.</i> Влияние влажности почвы на работу почвообрабатывающих машин и орудий . . . . .	206
Сопротивление почвы . . . . .	—
Консистенции почв и методы их определения . . . . .	209
Роль физико-механического состояния почвы в производстве полевых работ . . . . .	215
<i>Глава X.</i> Эффективность воздействия агротехнических мероприятий на водный режим почв и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур . . . . .	225
Агрогидрологическая роль паров . . . . .	226
Агрогидрологическая роль системы обработки зяби . . . . .	237
Влияние защитных лесных полос на режим влажности почвы и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур . . . . .	248

<i>Глава XI. Водный режим почв и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в условиях орошения . . . . .</i>	260
Пределы увлажнения почвы при орошении . . . . .	—
Агрометеорологические особенности произрастания сельскохозяйственных культур при орошении . . . . .	262
Режим влажности почвы и влагообеспеченность орошаемых зерновых культур по данным полевых опытов . . . . .	264
Влияние глубины стояния грунтовых вод на влажность почвы и формирование урожая орошаемых зерновых культур . . . . .	282
Эффективность орошения зерновых культур . . . . .	290
<i>Глава XII. Распределение запасов продуктивной влаги и влагообеспеченность зерновых культур на территории СССР . . . . .</i>	298
Запасы продуктивной влаги и влагообеспеченность озимых культур	299
Запасы продуктивной влаги и влагообеспеченность яровых культур	302
Агрогидрологические зоны СССР . . . . .	310
Литература . . . . .	314

*Стефания Антоновна Вериго  
Любовь Александровна Разумова*

## ПОЧВЕННАЯ ВЛАГА

Отв. редактор *М. С. Кулик*  
Редактор *А. С. Андреева*

Художник *Б. А. Быков*                      Худож. редактор *В. А. Каралкин*  
Техн. редактор *М. С. Костакова*                      Корректор *Г. Н. Римант*

Сдано в набор 16/VIII 1972 г. Подписано к печати 18/XII 1972 г. М-08518.  
Бумага 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>, типогр. № 1.      Печ. л. 20,5.      Уч.-изд. л. 23,51.  
Тираж 4000 экз. Индекс АЛ-241. Заказ 351. Цена 2 руб. 49 коп.  
Гидрометеониздат, Ленинград, В-53, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
Ленинград, Прачечный пер., 6.