



УДК. 551.571+551.577+551.586

*Одобрено Ученым советом  
Ленинградского гидрометеорологического института*

В настоящее время отсутствуют учебники и учебные пособия по агрометеорологии для вузов. Автор на основании опыта чтения лекций по этому курсу в ЛГМИ в течение 1957—1970 гг. составил краткое методическое пособие по двум основным разделам курса. При этом материал в пособии изложен в соответствии с программой курса агрометеорологии для метеорологических факультетов гидрометеорологических вузов.

*Серякова Людмила Павловна*

**Метеорологические условия и растения  
(учебное пособие по агрометеорологии)**

Редактор *Ю. П. Андрейков*

---

М-25251. Подп. к печати 3/VI 1971 г. Объем 4,81. Заказ 789. Тираж 1000 экз  
Цена 41 коп.

---

Типография ВВМУПП им Лен. комсомола

## Глава I

### **ЗНАЧЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Жизнь растений протекает при непрерывном взаимодействии их с окружающей средой, представляющей собой комплекс метеорологических (климатических), гидрологических (почвенных), биотических (связанных с влиянием других растений или микроорганизмов) условий и условий, определяемых деятельностью человека.

Среди окружающего растения комплекса внешних условий свет, тепло и влага являются основными. Они непосредственно воздействуют на растения и определяют скорость их роста и развития. Эти элементы называют факторами жизни растений. Другие метеорологические элементы, такие, как влажность воздуха, ветер, снежный покров, облачность, дымка и туман, являются косвенными факторами, изменяющими транспирацию растений, степень их нагревания или охлаждения и т. д., т. е. ослабляют или усиливают действие света, тепла и влаги.

Факторы жизни растений и косвенные факторы действуют на растения одновременно, поэтому установить влияние конкретного метеорологического элемента на физиологические процессы, протекающие в клетках растений, очень трудно. Для количественной оценки влияния отдельных факторов жизни растений на их рост и развитие обычно рассматриваются условия, при которых другие факторы не ограничивают развитие растений.

#### **§ 1. Роль солнечной радиации в жизни растений**

Поступление солнечной радиации к растениям является одним из важнейших условий их существования. Она служит источником энергии, которую растения используют в процессе фотосинтеза для создания ими органического вещества, оказывает существенное влияние на развитие растений (формирование органов, обра-

зование урожая, продолжительность вегетации), а также косвенно и непосредственно влияет на ряд процессов, обуславливающих важные свойства растений — зимостойкость и засухоустойчивость, стойкость к полеганию и т. д.

Солнечная радиация часто определяет форму и расположение листьев у растений, их цвет и строение, а также качественный состав плодов и семян. Так, в частности, с ростом интенсивности солнечной радиации и увеличением числа безоблачных дней повышается содержание сахара в сахарной свекле, винограде, плодовых и возрастает содержание белка в зерновых.

Основным процессом, находящимся под непосредственным влиянием солнечной радиации, является фотосинтез растений. Исследованию этого процесса посвящены труды великого русского физиолога К. А. Тимирязева.

Известно, что урожай сельскохозяйственных растений получается высоким, если в течение всего вегетационного периода потребности растений полностью удовлетворяются. Питание растений — сложный процесс. Оно включает усвоение из почвы минеральных солей; из воздуха — азота, который высшие растения получают через посредство низших организмов, и углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), усваивающегося в процессе фотосинтеза (ассимиляции). В процессе фотосинтеза образуются органические вещества, составляющие 90—95% сухого веса урожая. Ведущее значение фотосинтеза в формировании урожая можно иллюстрировать следующими данными, приведенными в работах А. А. Ничипоровича.

В период наиболее интенсивного роста суточные приросты общей сухой массы на 1 га посевов составляют 80—150 кг, а в лучших случаях 300—500 кг. При этом в течение суток растения через корни усваивают в виде ионов: 1—2 кг азота; 0,1—0,5 кг фосфора; 2—4 кг калия; 2—4 кг других элементов. Всего 5—10,5 кг минеральных веществ.

В то же время растение усваивает в течение дня из воздуха через листья 150—300 и даже 1000 кг  $\text{CO}_2$ , т. е. количество, соответствующее содержанию  $\text{CO}_2$  над гектаром поля в слое воздуха высотой 30—60 м.

Из этого очевидна ведущая роль фотосинтеза в питании растений. Однако значение азотного, фосфорного, калийного и других видов питания также велико, так как они дополняют, а не заменяют и не исключают друг друга. Кроме того, в ряде случаев условия минерального корневого питания или водоснабжения оказываются недостаточными, и именно их изменение (путем определенной обработки почвы, поливов, удобрений) является наиболее эффективным и доступным средством воздействия на размеры и качество урожая.

## Понятие об ассимиляции и диссимиляции

Под влиянием солнечных лучей в растительных тканях происходит образование хлорофилла. В процессе ассимиляции окрашенные хлорофиллом части растений поглощают углекислый газ, который под влиянием света вступает в биохимическую реакцию соединения. В результате образуются органические соединения (крахмал, сахар, белки, жиры, органические кислоты и т. д.). При этом потребляется большое количество солнечной энергии. Одновременно растения выделяют кислород ( $O_2$ ).

Растениям свойствен и другой процесс — диссимиляция (и дыхание). Этот процесс противоположен ассимиляции. Диссимиляция состоит в постоянном поглощении растениями кислорода и выделении углекислого газа. При этом органические вещества, содержащиеся в клетках, разлагаются на углекислый газ и воду, а энергия, заключенная в них, освобождается. Естественно, что дыхание свойственно всем живым клеткам растений независимо от содержания хлорофилла, а сам процесс происходит как на свету, так и в темноте.

В течение суток соотношение между процессами ассимиляции и диссимиляции меняется. Днем усвоение углекислого газа идет в несколько раз (до 10 и более) быстрее, чем распад органического вещества при дыхании. Поэтому за светлое время суток в тканях растений накапливаются органические вещества, которые частично распадаются при дыхании растений ночью, но все же значительная часть их остается в тканях и идет на рост растений.

Неоднократно делались попытки оценить количество лучистой энергии, используемое растениями для создания урожая. Оценка производилась путем сжигания сухого вещества урожая в калориметрах. Произведение калорийности вещества ( $k$ ) на величину урожая с единицы площади ( $Y$ ) характеризует запасы потенциальной энергии в урожае ( $Q_{\text{пот}} = k \cdot Y$ ). Отношение потенциальной энергии в урожае с единицы площади к суммарной радиации, полученной той же площадью ( $S + D$ )<sub>полн</sub>, выраженное в процентах, называется техническим коэффициентом использования солнечной энергии.

$$\eta = \frac{Q_{\text{пот}}}{(S + D)_{\text{полн}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Оказалось, что на фотосинтез расходуется только часть (около 2—5%) приходящей солнечной энергии. Большая ее часть идет преимущественно на транспирацию (испарение) и теплообмен растений с воздухом и почвой. Наибольшим значением технического коэффициента обладают масличные культуры (лен — 4%), наименьшими — овощные (свекла — 2%, картофель — 3%). В зависимости от урожая культуры величина  $\eta$  обычно растет.

Интенсивность фотосинтеза и других физиологических процессов в растениях зависит от физических особенностей и характера лучистого потока, а именно: 1) от спектрального состава лучистого потока; 2) от интенсивности радиации; 3) продолжительности освещения.

### Роль спектрального состава радиации в жизни растений

Лучи разных длин волн, входящие в состав солнечной радиации, усваиваются растениями неодинаково и играют в их жизни разную роль.

Известно, что лучи видимой части спектра, составляющие около 50% солнечной радиации, интенсивно отражаются наземными предметами. Растительные покровы характеризуются большим разнообразием отражательных свойств, зависящих как от вида растений, так и от степени их развития. Однако, для большинства сельскохозяйственных культур (рис. 1), характерно снижение отражательной способности в сине-фиолетовой ( $\lambda=0,45-0,50$  мкм) и в красной ( $\lambda=0,65-0,70$  мкм) частях спектра.

В желто-зеленой части спектра ( $\lambda=0,50-0,65$  мкм) наблюдается возрастание отражательной способности растений. Поэтому участие этих волн в фотосинтезе незначительно. Как видно из рис. 1, по мере роста растений спектральное альbedo меняется, и наиболее четкая зависимость отражательной способности от длины волны имеет место у молодых растений. Указанные закономерности были выявлены Е. Л. Криновым как для культурных, так и для дикорастущих растений, в том числе для лесных насаждений.

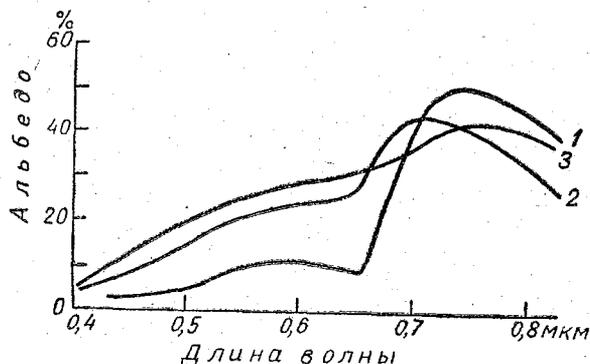


Рис. 1. Спектральное альbedo поля ячменя. Карадаг, безоблачное небо:

1 — ячмень зеленый; 2 — ячмень желтый;  
3 — стерня ячменя.

Однако, Н. Н. Калитин и Е. А. Лапухина установили, что максимум альбедо для лесных участков часто наблюдается не в желто-зеленой части спектра, а в красной. Следовательно, участие лучей различных длин волн в фотосинтезе неодинаково.

Как показали исследования К. А. Тимирязева, процесс ассимиляции протекает в основном под влиянием красных и сине-фиолетовых лучей, которые хорошо поглощаются хлорофиллом. При этом максимум фотосинтеза находится в области красных лучей. Второй максимум, лежащий в сине-фиолетовой области, несколько слабее первого. Лучи двух указанных диапазонов длин волн называются физиологической или фотосинтетически активной радиацией.

Б. И. Гуляев, В. А. Шаблевская, М. И. Будыко, Н. А. Ефимова под фотосинтетически активной радиацией понимают всю видимую часть спектра. В настоящее время установлено, что некоторые растения способны частично ассимилировать и в желто-зеленой части спектра.

Неоднократно делались попытки установить долю физиологической радиации в общем потоке солнечной энергии. По данным Ю. Росса и Х. Тооминга, в прямой радиации при высоте солнца более  $35^\circ$  она составляет около 43% от общего потока радиации, при меньших высотах содержание ее падает. В рассеянной радиации содержится около 57% физиологических лучей. Следовательно, при фотосинтезе рассеянная радиация используется полнее, чем прямая.

Действие света на растения многообразно и не ограничивается фотосинтезом. Известно, что лучи видимой части спектра очень сильно влияют на скорость прохождения растениями отдельных межфазных периодов и на накопление сухого растительного вещества. По отношению к ультрафиолетовым лучам растительный покров, отражающий до 30% видимой энергии, ведет себя, как сажа. Однако ультрафиолетовая радиация составляет у земли всего лишь 1—3% от общего количества солнечной энергии и поэтому существенной роли в фотосинтезе она играть не может. Вообще роль этой радиации в жизни растений изучена недостаточно. Но известно, что ультрафиолетовая радиация обладает большим биологическим эффектом, так как под ее влиянием погибают многие микроорганизмы, оказывая таким образом дезинфицирующее воздействие на растения. Поэтому прогревание семян на солнце перед посевом повышает их всхожесть. Проведенное в лаборатории светофизиологии Агрофизического института кратковременное облучение плодов цитрусовых культур ультрафиолетовой радиацией показало, что при облучении не только ликвидируются очаги поражений плодов бактериями, но и в дальнейшем при хранении в обычных условиях уменьшается их заражение. Известно,

стно также влияние ультрафиолетовых лучей с длиной волны от 0,290 до 0,313 мкм на поступление в растение минеральных веществ и на образование витамина D.

На инфракрасную часть лучистой энергии ( $\lambda > 0,76$  мкм) приходится около половины потока солнечной энергии, однако, как видно из рис. 1, поглощается она листьями весьма незначительно. Исключение составляют лучи с длиной волны 1,10—2,50 мкм, которые хорошо усваиваются содержащейся в листьях водой.

Приходя на поверхность почвы, инфракрасные лучи трансформируются в тепло и таким образом влияют на тепловой режим растений, иногда вызывая сильный их перегрев. Но вопрос о роли этой радиации в жизни растений нельзя считать решенным. Опытами установлено, что инфракрасная радиация ускоряет развитие одних и замедляет развитие других видов растений, а это зависит от внешних условий и мощности лучистого потока. Исследование вопроса о влиянии инфракрасной радиации на растения важно для их выращивания при искусственном освещении.

#### Влияние интенсивности радиации на жизнь растений

Интенсивность и продолжительность периода ежесуточного освещения имеют чрезвычайно большое значение для жизнедеятельности растений. Они характеризуют общее количество лучистой энергии, получаемое растениями за определенный период. Отсюда ясна необходимость знания реакции растений как на каждый из этих факторов, так и на определенные их сочетания.

По отношению к интенсивности солнечной радиации растения делятся на светолюбивые и теневыносливые. Первые виды плохо или совсем не растут при слабом освещении и не боятся сильного света, а вторые могут расти при меньшей интенсивности радиации и иногда страдают от избыточного освещения. К светолюбивым растениям относятся сосна, лиственница, береза, осина, дуб, клен, ясень, большинство злаков, а к теневыносливым — ель, липа, бук, ольха, папоротник, черничник и др. Светолюбивые растения имеют толстую шероховатую кору и не боятся заморозков и солнечных ожогов. Для теневыносливых, наоборот, характерна тонкая, гладкая кора и более развитая густая крона. Эти два вида растений не резко разграничены. Между ними имеются переходные формы, которые способны выносить как длительное затенение, так и интенсивное освещение.

С ростом интенсивности света у всех видов растений ускоряется процесс фотосинтеза. Последний начинается при очень низкой интенсивности солнечной радиации, но при этом образование новых органических веществ может лишь уравновешивать их расход при дыхании. Интенсивность радиации, при которой наступает

такое уравнивание, носит название «компенсационного пункта». У разных растений компенсационный пункт различен. У теневыносливых растений компенсация наступает при интенсивности поглощения суммарной солнечной радиации около  $0,03 \text{ кал/см}^2\text{мин}$ , а у светолюбивых — при интенсивности около  $0,05 \text{ кал/см}^2\text{мин}$ . Дальнейшее повышение интенсивности радиации сопровождается усилением фотосинтеза (рис. 2). Однако, при сравнительно невысокой интенсивности солнечной радиации, но при благоприятном температурном и водном режиме наступает так называемое световое насыщение.

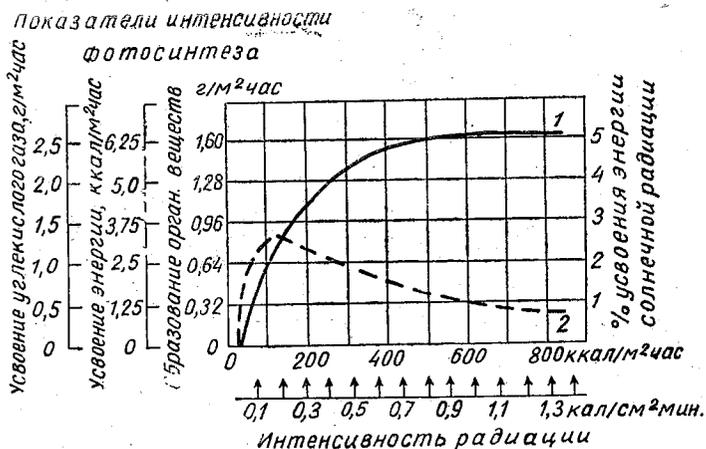


Рис. 2. Световая кривая (1) фотосинтеза в ( $\text{г/м}^2\text{час}$ ) и соответствующая ей кривая усвоения энергии в % от падающей (2).

У светолюбивых растений световое насыщение имеет место при интенсивности радиации около  $0,6—0,8 \text{ кал/см}^2\text{мин}$ , а у теневыносливых — примерно при  $0,2—0,3 \text{ кал/см}^2\text{мин}$ . Превышение этих пределов освещенности неблагоприятно для теневыносливых растений, которые могут получить ожоги. Если высокая интенсивность радиации сопровождается высокой температурой растения, то наступает распад хлорофилла, листья желтеют и гибнут. Для светолюбивых растений в условиях достаточного снабжения водой энергия большой интенсивности даже полезна, так как увеличивает сахаристость плодов, крахмалистость клубней, содержание белка в зернах и т. д. При недостатке влаги высокая интенсивность солнечной радиации может вызвать перегрев растений из-за малой транспирации. Кривая 2 рис. 2 показывает, что с уменьшением интенсивности радиации увеличивается процент использования ее

энергии на фотосинтез, что еще раз подтверждает лучшее использование рассеянной радиации растениями.

Влияние солнечной радиации на ассимиляционную деятельность растений в большой степени зависит от температурных условий. Чем ниже температура воздуха и растений, тем большие мощности лучистого потока используются растениями без вреда для их нормальной жизнедеятельности.

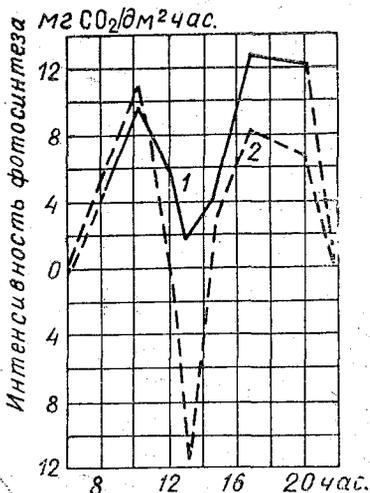


Рис. 3. Дневной ход фотосинтеза пшеницы с поливом (1) и без полива (2).

При хорошей влагообеспеченности и оптимальном температурном режиме суточный ход фотосинтеза определяется суточным ходом радиации. Обычно в утренние часы фотосинтетический аппарат растений особенно активен, и интенсивность фотосинтеза возрастает практически пропорционально интенсивности солнечной радиации, достигая максимума к 9—12 часам. Затем нередко наблюдается некоторый спад интенсивности фотосинтеза, определяемый дефицитом влаги в клетках растений из-за высокой испаряемости, который к 16—17 часам сменяется вторичным, но часто менее сильным подъемом. Наконец, в вечерние часы к моменту захода солнца, интенсивность фотосинтеза уменьшается до нуля. Как видно из рис. 3, днем интенсивность фотосинтеза особенно низка при недостаточном водоснабжении. При наличии облачности, достаточном водоснабжении растений, благоприятном температурном режиме кривая фотосинтеза может иметь один максимум или очень слабый спад в полуденные часы.

#### Влияние продолжительности освещения на развитие растений

Рядом ученых, а ранее других К. А. Тимирязевым, было установлено, что реакция различных видов растений на продолжительность солнечного освещения неодинакова. В зависимости от географического расположения родины растений, они приспособились к определенному соотношению длины дня и ночи.

Реакция растений на соотношение продолжительности дня и ночи называется фотопериодизмом. Явление фотопериодиз-

ма играет ведущую роль на второй (световой) стадии развития.

Одни растения проходят световую стадию при длинном (16—17 часов) дне. При увеличении длины дня или при непрерывном освещении скорость развития этих растений становится еще больше, отчего сокращается вегетационный период. Это — растения длинного дня. К ним относятся пшеница, ячмень, рожь, овес, горох, вика, чечевица, лен и др. Их можно успешно продвигать в северные районы, где большая продолжительность летнего дня компенсирует краткость теплого периода. Опыты, проведенные итальянским ученым Дж. Ацци, показали, что яровая пшеница по мере продвижения к северу в северном полушарии резко уменьшает продолжительность периода от прорастания до колошения. При этом соответственно уменьшается и количество получаемого растением тепла. Так, если на  $15^{\circ}$  с. ш. за указанный период сумма температур, полученная яровой пшеницей, составила  $1470^{\circ}$ , то на  $65^{\circ}$  с. ш., где долгота дня летом в два раза больше, сумма температур равна  $750^{\circ}$ .

Другие растения, например, культуры южного происхождения — хлопчатник, соя, кукуруза, подсолнечник, просо, конопля и др., быстрее развиваются при коротком (12—14 часов) дне и продолжительной ночи. Это — растения короткого дня. При выращивании их при длинном дне или непрерывном освещении очень замедляются темпы развития и в ряде случаев они могут не прийти к плодоношению. У растений короткого дня необходимые в световую стадию стадийные преобразования содержимого клеток происходят в основном в темную часть суток. Следовательно, эти культуры труднее продвигать в северные районы.

Различные сорта одного вида растений неодинаково относятся к продолжительности дня. Например, подсолнечник — растение короткого дня, но есть сорта его, ускоряющие свое развитие при длинном северном дне, что и определяет чрезвычайно широкое распространение этой культуры по территории Советского Союза, вплоть до  $50^{\circ}$  с. ш. После прохождения световой стадии растения не реагируют на изменение продолжительности дня.

При выращивании растений в закрытом грунте (теплицы, оранжереи) можно в широких пределах изменять продолжительность освещения, создавая растениям оптимальные условия. Применение искусственного света в растениеводстве называется светокulturой растений. При наличии светокультуры можно получать урожай овощей и в зимние месяцы (ноябрь — январь), когда продолжительность дня в северных районах мала. Основная трудность использования электрического освещения для выращивания растений состоит в том, что состав получаемых лучей не всегда благоприятен для растений, так как в общем потоке излучения ламп накаливания преобладает инфракрасная радиация (88%), вызы-

вающая перегрев растений. Как показали исследования, проведенные в Агрофизическом институте, в видимой части спектра ламп накаливания сине-фиолетовое излучение в несколько раз меньше, чем красно-оранжевое, что мешает созданию условий, подобных солнечным. В виде дополнительного источника синего и фиолетового света, имеющегося в минимальных количествах в спектре ламп накаливания, используются ртутные лампы, почти 40% энергии излучения которых падает на длины волн 0,405 и 0,436 мкм. Добавление излучения ртутных ламп к радиации ламп накаливания приближает спектральный состав искусственного света к солнечному.

В последнее время в светокультуре растений широкое распространение получили флюоресцентные и люминесцентные лампы, спектр света которых ближе к дневному. В нем мало инфракрасных лучей, что способствует нормальному тепловому режиму растений.

## § 2. Роль тепла в жизни растений

Температуру растительного организма можно представить себе как своеобразный итоговый показатель, характеризующий в каждый данный момент изменения прихода-расхода лучистой энергии в зависимости от прозрачности атмосферы, облачности, особенностей циркуляции, физических особенностей самого организма и т. д.

Тепловой режим растений складывается под влиянием радиационного баланса, теплообмена с окружающим воздухом и испарения влаги растениями. В результате этих процессов изменяется температура растений.

Влияние каждого из этих факторов на температуру растений в отдельности установить чрезвычайно трудно. Кроме того, степень нагревания растений зависит от многих других условий, а именно: формы листьев и их ориентации относительно солнца, альбедо растений, экспозиции склонов. К тому же на температурный режим растений влияют почвенные условия, в частности степень увлажнения почвы.

В настоящее время имеются отдельные измерения температуры листьев различных культур. Однако этот материал еще недостаточен для обобщений. Поэтому часто для оценки термического режима растений используют температуру воздуха среди растений или температуру воздуха в психрометрической будке.

### Влияние температуры на рост растений (интенсивность процессов ассимиляции и диссимиляции)

Температура, так же как и свет, оказывает влияние на биохимические процессы в клетках, а следовательно, на рост и развитие

растений. Величина и продолжительность воздействия температуры определяют процесс ассимиляции.

Рост растений, проявляющийся в накоплении органической массы, является результатом двух противоположных процессов — ассимиляции и диссимиляции. Влияние температуры на эти два процесса различно. Однако, как для ассимиляции, так и для диссимиляции общим является наличие точек минимума, оптимума и максимума температуры, соответствующих разной интенсивности процесса. При температуре ниже точки минимума процессы ассимиляции и диссимиляции приостанавливаются в результате недостатка тепла. При температуре выше точки максимума оба процесса прекращаются от избытка тепла. Наконец, для каждого из этих процессов можно указать оптимальную температуру, при которой фотосинтез и диссимиляция протекают с наибольшей интенсивностью.

Некоторое время считали, что интенсивность основных жизненных процессов подчиняется правилу Вант-Гоффа, согласно которому скорость химической реакции при повышении температуры на каждые  $10^{\circ}$  удваивается или утраивается. Например, если температура увеличилась с  $5$  до  $15^{\circ}$ , то количество продукта, образовавшегося в результате химической реакции, возрастает вдвое или втрое. Естественно, что при повышении температуры протоплазма клеток растений становится более проницаемой для углекислого газа, что приводит к усилению ассимиляции.

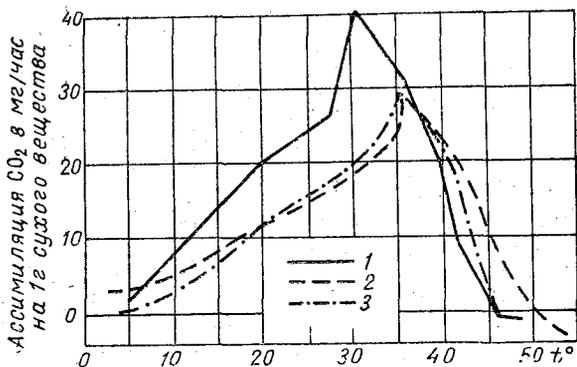


Рис. 4. Зависимость фотосинтеза листьев от температуры листьев при оптимальном снабжении  $\text{CO}_2$  ( $1,22\% \text{CO}_2$ ):

1, 2, 3 — листья картофеля, огурцов, томатов соответственно

Однако процессы, протекающие в клетках растений, намного сложнее обычных химических реакций. Поэтому при ассимиляции, даже при оптимальности прочих условий, например достаточном количестве  $\text{CO}_2$ , правило Вант-Гоффа выполняется только в определенном интервале температур. Это убедительно показано в работах академика Н. А. Максимова. Как видно из рис. 4, ассимиляция в интервале от  $0^\circ$  до  $30\text{--}35^\circ$  с повышением температуры от точки минимума растет в среднем по правилу Вант-Гоффа. При температуре  $25\text{--}30^\circ$  процесс ассимиляции становится наиболее интенсивным. Эту температуру можно определить как точку оптимума. Затем с ростом температуры интенсивность ассимиляции падает и при  $45\text{--}50^\circ$  она полностью прекращается.

Вид кривой и положение точки оптимума меняются в зависимости от особенностей сельскохозяйственных культур. У теплолюбивых культур (томаты, огурцы) максимум ассимиляции наблюдается при более высоких температурах, чем у растений менее требовательных к теплу (картофель). Кроме того, интенсивность

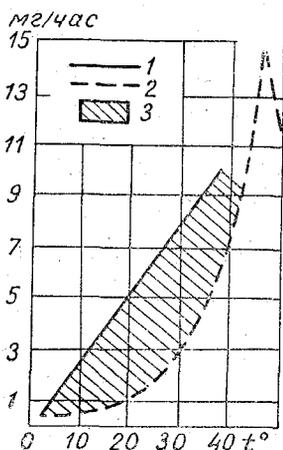


Рис. 5. Зависимость ассимиляции и диссимиляции от температуры:

1 — ассимиляция; 2 — диссимиляция; 3 — прирост органической массы.

Точка минимума имеет место при температуре  $-10^\circ$ , а у зимующих растений  $-20\text{--}25^\circ$ . Точка оптимума у большинства растений находится в пределах  $36\text{--}40^\circ$ , а точка максимума — при температуре более  $50^\circ$ .

От взаимодействия процессов фотосинтеза и дыхания зависит прирост органической массы растений. Так как оба эти процесса

ассимиляции при одинаковой температуре тоже существенно различна. Оптимум температуры зависит не только от особенностей растений, но и от ряда внешних причин. Например, чем интенсивнее свет и выше концентрация  $\text{CO}_2$  в окружающем воздухе, тем выше оптимальная температура ассимиляции.

При недостатке влаги в почве при тех же температурных условиях вследствие ограниченного поступления воды к клеткам растений устьица закрываются и ассимиляция замедляется.

Если графически изобразить зависимость диссимиляции от температуры растения, то кривая для той же культуры будет иметь несколько иной вид, чем кривая ассимиляции, и отличаться положением точек минимума, максимума и опти-

зависят одновременно от внешних факторов, то накопление органического вещества можно рассматривать как разность количества органического вещества, образовавшегося в результате фотосинтеза и распавшегося при дыхании (рис. 5). Следовательно, если на основании этого изобразить зависимость процесса накопления вещества от температуры, то кривая будет иметь дугообразный вид с теми же тремя кардинальными точками, значения которых получены при прочих оптимальных условиях.

В течение суток температура растений существенно меняется, что определяет изменение интенсивности процессов ассимиляции и диссимиляции, а следовательно, и энергии роста. Максимальная энергия роста имеет место днем при высокой температуре воздуха, ночью она минимальна и даже может быть отрицательной, что является следствием наличия диссимиляции при отсутствии фотосинтеза.

### Влияние температуры на развитие растений

Температура растений — один из основных факторов, определяющих скорость развития сельскохозяйственных культур. Поэтому важной задачей агрометеорологии является выяснение связей темпов развития разных культур с их температурой, в том числе и установление нижнего предела температуры, при которой осуществляется развитие.

Растения начинают свои жизненные процессы не сразу после оттаивания и установления положительной температуры воздуха, а при достижении определенного ее уровня. Эта начальная температура называется биологическим минимумом температуры, знание которого необходимо для ряда агрометеорологических прогнозов и расчетов. По данным В. Н. Степанова, каждая культура имеет свой биологический минимум температуры, меняющийся в разные периоды развития культур (табл. 1).

Исследования, проведенные в Гидрометеорологическом центре СССР, показали, что многочисленная группа растений, биологические особенности которых складывались под влиянием умеренного климата с присущим ему холодным и теплым периодами года, имеет одинаковый биологический минимум температуры воздуха, близкий к  $5^{\circ}$ .

Как видно из табл. 1, холодостойкие культуры начинают интенсивное развитие при более низких температурах, чем теплолюбивые, биологические особенности которых оформились под воздействием климата родины этих культур, а именно тропических и субтропических районов земного шара. Приведенные в таблице биологические минимумы температуры являются средними и их нельзя считать постоянными. В зависимости от сорта растений, типа почвы, способа ее обработки, степени увлажнения они могут

Таблица 1

**Биологические минимумы температуры растений полевой культуры  
в разные периоды вегетации, °С.**

Культура	Появление всходов и фор- мирование ве- гетативных органов	Формирование органов пло- доношения	Культура	Проявление всходов и фор- мирование ве- гетативных органов	Формирование органов пло- доношения
<b>Зерновые хлеба</b>			<b>Зерновые бобовые</b>		
Пшеница яровая . . . . .	4—5	10—12	Горох . . . . .	4—5	8—10
Ячмень . . . . .	4—5	10—12	Соя . . . . .	10—11	15—18
Овес . . . . .	4—5	10—12	Фасоль . . . . .	12—13	15—18
Просо . . . . .	10—11	12—15	<b>Масличные</b>		
Кукуруза . . . . .	10—13	12—15	Подсолнечник . . . . .	7—8	12—15
Рис . . . . .	14—15	18—20	Конопля . . . . .	2—3	10—12
Гречиха . . . . .	7—8	10—12	Хлопчатник . . . . .	14—15	15—20

колебаться в довольно широких пределах. Как показали исследования последних лет, даже для одного и того же сорта растений биологический минимум температуры не остается постоянным. Так, В. Н. Дмитриенко установлено, что озимая пшеница вегетирует при средней положительной температуре 2,9° и ниже.

Снижение температуры ниже биологического минимума ведет к приостановке процессов роста и развития, но еще не вызывает гибели растений. Однако, при температурах ниже биологического минимума, особенно при высокой влажности почвы, семена загнивают.

Скорость прохождения всего цикла вегетации или отдельных межфазных периодов в большой степени определяется температурным режимом растения. Поэтому можно установить связь между продолжительностью межфазных периодов или всей вегетации и температурой воздуха. При этом принято считать, что для прохождения конкретного межфазного периода растение должно накопить в одних случаях определенную сумму среднесуточных температур (за период с температурой выше 0°), в других — сумму активных температур (за период с  $t > 10^\circ$ ), или сумму температур выше биологического минимума (сумму эффективных температур). Метод суммирования положительных среднесуточных температур или активных температур основан на предпосылке о физиологической равноценности каждого градуса температуры. Предполагается, что эффект действия температуры на биологические процессы возрастает прямо пропорционально росту температуры

до некоторых значений. Метод положительных среднесуточных температур применялся для оперативных целей как в СССР (А. И. Носатовский), так и за рубежом (Г. Жеслен). Метод активных температур широко использовался в агроклиматологических исследованиях советских ученых — Г. Т. Селянинова, С. А. Сапожниковой, Ф. Ф. Давитая, А. И. Руденко. В основе этих методов лежит предположение о постоянстве сумм температур за данный межфазный период или за вегетацию в целом, т. е.

$$\Sigma t = t \cdot n, \quad (2)$$

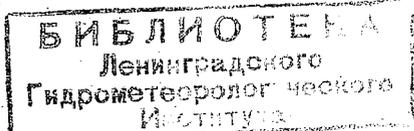
где  $t$  — среднесуточная температура воздуха за данный период;  $n$  — число дней в периоде;  $\Sigma t$  — постоянная сумма температур, необходимая растениям в данный межфазный период или за всю вегетацию. Различие методов суммирования положительных среднесуточных температур состоит в том, что в первом методе суммируются все температуры выше  $0^\circ$ , а во втором — среднесуточные температуры за период, когда их значения выше  $10^\circ$ .

Сумма активных температур может быть определена как из ежедневных наблюдений, так и по средним многолетним данным. Подсчет сумм ведется, начиная с даты перехода среднесуточной температуры воздуха через  $10^\circ$ . При этом, если среднесуточная температура воздуха равна  $10,1^\circ$ , то в сумму активных температур включается  $10,1^\circ$ , а температуры ниже  $10^\circ$  в расчет не принимаются. Вычисление сумм активных температур по многолетним данным проводится с помощью графика годового хода температуры. Определив на графике даты весеннего и осеннего переходов температуры воздуха через  $10^\circ$ , суммируют температуры воздуха за период между этими датами. Вычисленные таким образом суммы активных температур оказываются различными для разных сельскохозяйственных культур.

Из приведенных ниже данных следует, что позднеспелым культурам (кукуруза) свойственны большие, а раннеспелым — меньшие суммы активных температур ( $\Sigma t^\circ$ ), необходимые для созревания или технической спелости:

Лен на волокно	1100
Овес (Победа, Золотой дождь)	1300
Томаты (Бизон)	1150
Огурцы (Муромские)	1500
Картофель (ранние сорта)	1200
Яровая пшеница (Лютесценс 062)	1300
Просо (Саратовское 742)	1700
Кукуруза раннеспелых сортов	1500—2000
Кукуруза среднеспелых сортов	2000—2500
Кукуруза позднеспелых сортов	2500—3000

В основу метода сумм эффективных температур положена предположка о существовании прямолинейной связи между суммой



249920

среднесуточных эффективных температур и продолжительностью межфазных периодов. В отличие от рассмотренных выше методов здесь придается равноценное физиологическое значение каждому градусу среднесуточной температуры воздуха выше биологического минимума температуры. Эффективная температура при этом рассчитывается по формуле

$$t_{\text{эфф}} = (t - t_0), \quad (3)$$

где  $t$  — средняя за период из среднесуточных температур;  $t_0$  — биологический минимум температуры. Сумма эффективных температур за определенный период может быть вычислена так:

$$\Sigma t_{\text{эфф}} = (t - t_0) \cdot n, \quad (4)$$

где  $n$  — число дней в периоде. Подобная температура использовалась в работах Т. Д. Лысенко, а применительно к нуждам агрометеорологической службы Советского Союза, для растений умеренного пояса, разработана А. А. Шиголевым.

Подсчет сумм эффективных температур производится двумя способами. По первому способу из среднесуточной температуры каждого дня межфазного периода вычитают биологический минимум температуры и остатки за весь период складывают. По второму способу суммируются среднесуточные температуры за межфазный период, вычисляется среднее из среднесуточных значение и из него вычитается биологический минимум температуры. Полученная таким образом средняя эффективная температура умножается на число дней в периоде. Так как биологический минимум температур меняется в течение вегетационного периода, то суммы эффективных температур обычно вычисляют по межфазным периодам. Величина их, так же как и сумма активных температур, неодинакова у различных видов сельскохозяйственных культур (табл. 2).

При нормальных сроках посева и благоприятных условиях развития суммы эффективных температур для каждого сорта той

Таблица 2

Суммы эффективных температур для зерновых культур (по А. А. Шиголеву), °С,

Культура	Период	
	от выхода в трубку до колошения (выметывания)	от колошения (выметывания) до восковой спелости
Пшеница (Лютесценс 062)	330	490
Овес (Победа) . . . . .	378	428
Ячмень (Кубанец) . . . . .	330	388

или иной культуры почти постоянны. Это позволяет, используя уравнение (4), по прогнозируемой эффективной температуре находить продолжительность межфазного периода, а именно:

$$n = \frac{\Sigma t_{эфф}}{t - t_0} \quad (5)$$

Уравнение (5) является основным в фенологических прогнозах.

При подсчете сумм температур любым способом в них включаются высокие температуры, которые, увеличивая общую сумму, не ускоряют темпа развития растений. Эти температуры называют балластными (вопрос о способах учета последних не изучен).

#### Суточный ход температуры воздуха и термопериодизм растений

Суточный ход температуры воздуха оказывает большое влияние на рост и развитие растений. Большая амплитуда суточного хода температуры воздуха в континентальном климате благоприятствует накоплению органического вещества не только за счет более высоких дневных температур, когда происходит процесс ассимиляции, но и за счет более низкого ночного минимума температуры, при котором замедляется расход органических веществ на дыхание растений. В условиях континентального климата растения быстрее вызревают и дают урожай более высокого качества. Ряд исследователей указывает, что растения приспособились к определенному типу суточного хода температуры и испытывают потребность в смене количества тепла в дневные и ночные часы (термопериодизм). По данным А. А. Малышева, у растений длинного дня процессы развития протекают в основном в дневные часы, а у растений короткого дня — в темноте. Поэтому у растений длинного дня темпы развития ускоряются при повышенной дневной температуре воздуха, а у растений короткого дня — при повышении ночной, поэтому явление термопериодизма является для растений столь же важным, как и фотопериодизм. Детальное исследование амплитуды суточного хода температуры на территории Советского Союза проведено З. А. Мищенко. В настоящее время экспериментальным путем ориентировочно получены оптимальные температуры воздуха отдельно для ночных и дневных часов.

Приведенные в табл. 3 оптимальные температуры получены в оранжерейных условиях, где можно создавать любые сочетания дневных и ночных температур. Можно предполагать, что в полевых условиях оптимальные температуры будут несколько иными.

Следствием термопериодизма является и химический состав растений. Согласно многочисленным исследованиям, существует прямая связь между химическим составом растений и континентальностью климата. В континентальном климате повышается

Оптимальные средние дневные и средние ночные температуры для различных культурных растений, °С

Культура	Вегетативный период		Репродуктивный период	
	Температура воздуха			
	дневная	ночная	дневная	ночная
Картофель . . . . .	20	12—14	20	14
Томаты . . . . .	26—30	17—20	26	13—18
Баклажаны . . . . .	26	20	20	14
Табак . . . . .	26—30	15	22—26	15
Горох . . . . .	20—23	14	—	—

сахаристость фруктов и корнеплодов. Например, в Средней Азии произрастают наиболее богатые сахаром плоды: виноград, яблоки, дыни, арбузы и т. д. В условиях морского климата повышается содержание крахмала у зерновых культур и уменьшается содержание белковых веществ.

По данным К. А. Флексбергера, наименьшее содержание белкового вещества в зернах яровой пшеницы во всем мире имеет место в Марокко, где оно составляет 5,4%, а наибольшее в США (штат Канзас) — 26,5%. Согласно исследованиям советских ученых, содержание белка в зерне яровой пшеницы возрастает на территории ЕТС с северо-запада на юго-восток в среднем от 8—10 до 18—20%, а в отдельные годы — до 20—26%. Аналогичная закономерность наблюдается в накоплении белка яровой рожью, масла — масличными культурами, сахара — сахарной свеклой.

Содержание белка, по данным З. А. Мищенко, хорошо коррелируется со средней за вегетационный период амплитудой суточного хода температуры воздуха в условиях ЕТС, Западной и Восточной Сибири, Казахстана, Алтайского и Приморского краев. Коэффициент корреляции для этих районов равен 0,85, что позволило установить следующее аналитическое выражение этой зависимости:

$$b = 1,29 \cdot a_t + 2,1, \quad (6)$$

где  $b$  — процентное содержание белка в яровой пшенице;  $a_t$  — амплитуда суточного хода температуры воздуха (в среднем за вегетационный период). Следовательно, по амплитуде суточного хода температуры воздуха с достаточной для практических целей точностью можно определить содержание белка в яровой пшенице.

### § 3. Роль воды в жизни растений и их влагообеспеченность

#### Понятие о транспирации и влагопотреблении растений

Вода в жизни растений играет очень важную роль. Она растворяет питательные вещества, содержащиеся в почве, и доставляет их в ткани растений. В клетках растений вода принимает участие в образовании углеводов, разлагаясь в процессе фотосинтеза на молекулы кислорода и водорода. Наконец, вода играет роль охладителя, испаряясь из внутренних частей растений и понижая при этом их температуру. Следовательно, нормальные жизненные процессы могут протекать лишь при наличии воды в тканях растений. Обезвоживание протоплазмы клеток приводит к потере жизнеспособности и гибели растений.

Вода добывается растениями практически только из почвы путем всасывания ее корнями с помощью корневых волосков и корневых мочек — тончайших окончаний корней. Корневые волоски проникают в почвенные капилляры и всасывают влагу. Такое всасывание происходит благодаря тому, что клетки корневых волосков обладают некоторым недостатком воды сравнительно с почвой (сосущей силой). Протоплазма клеток легко проницаема для воды и непроницаема для веществ, растворенных в клеточном соке. Вследствие разности капиллярного натяжения в обезвоженных точках и в смежных участках, возникшей в результате всасывания влаги, вода начинает перемещаться к точкам соприкосновения корешков с почвой. Таким образом обеспечивается регулярный подток воды к корневой системе растений. Сила, заставляющая подниматься воду по клеткам и сосудам растений, называется осмотическим давлением (осмосом). Это не что иное, как давление клеточного сока. Как следует из работ Н. А. Максимова, у культурных растений осмотическое давление составляет 5—12 атмосфер, достигая в корнях свеклы и ягодах винограда 20—40 атмосфер, а у дикорастущих — еще большей величины. Всасывание воды клетками корневого волоска вызывает растяжение клетки. Клеточная оболочка оказывает на содержимое клетки эластичное противодействие (тургорное давление), действующее в направлении, противоположном осмотическому давлению, и стремящееся уравновесить его. Поступление воды в клетку будет продолжаться до тех пор, пока тургорное давление ( $p'$ ) не уравновесит всю величину осмотического давления клеточного сока ( $p$ ). При этом сосущая сила будет равна нулю. С потерей клеткой воды при испарении тургорное давление уменьшается, а сосущая сила увеличивается. Следовательно, в каждый момент величина сосущей силы клетки ( $s$ ) будет равна разности между осмотическим давлением клеточного сока и тургорным напряжением растянутой оболочки, т. е.,

$$s = p - p'. \quad (7)$$

Для бесперебойного снабжения растений водой необходимо, чтобы величина сосущей силы была больше сил, связывающих воду с почвенными частицами, что имеет место при хорошем увлажнении почвы. По мере иссушения почвы водоудерживающая способность ее увеличивается и может стать больше сосущей силы растения. В этом случае поступление воды в корневые волоски прекращается.

Из насыщенной клетки корневого волоска вода начинает поступать в соседнюю с ней ненасыщенную клетку. Так от клетки к клетке вода поступает во внутренние слои, заполняя все ткани растений, и достигает центральной сосудистой системы корня. В результате нагнетания воды корнями клетки растений скоро оказались бы насыщенными водой, прекратилось бы поступление воды, а вместе с ней и питательных веществ. Но в растениях всегда наблюдается потеря воды путем испарения. В процессе дыхания растения открывают устьица, мельчайшие отверстия на поверхности листа. В среднем на  $1 \text{ см}^2$  поверхности листа приходится 200—400 устьиц. Вместе с газообменом наблюдается диффузия водяного пара из устьиц в воздух. Частично проникновение водяного пара происходит и через поверхность листа.

Процесс испарения влаги самими растениями называется транспирацией. В отличие от испарения транспирация определяется не только метеорологическими факторами, но на нее оказывают влияние также анатомические и физиологические особенности самих растений, в том числе способность устьиц закрываться при недостатке воды и в темный период суток.

В физиологии растений различают внешние и внутренние факторы транспирации. Под внешними факторами понимают климатические условия, а также вид почвы и агротехнику. В основном на интенсивность транспирации влияют следующие элементы климата: температура, влажность воздуха, ветер и количество радиации. В условиях бесперебойного снабжения растений водой и питательными веществами в процессе транспирации ведущее место принадлежит внешним факторам. В этом случае величина транспирации растений хорошо коррелируется с целым рядом метеорологических элементов (дефицитом влажности, ветром) и особенно испаряемостью. Это было показано как советскими (Н. А. Максимов), так и зарубежными (Дилман) учеными.

Внутренние факторы транспирации связаны с процессами, происходящими в самом растении, и состоят в способности растений регулировать транспирацию под воздействием внешней среды.

Исследования академика Н. А. Максимова показали, что суточный ход транспирации определяется влиянием внешних и внут-

ренных факторов. Обычно устьица растений открываются на рас-свете, достигая при достаточной влажности почвы максимума открытия в дополуденные часы. Одновременно и транспирация, являющаяся следствием состояния устьиц, возрастает. К полудню устьица начинают сужаться и закрываются перед заходом солнца. При этом транспирация резко уменьшается. Ночью транспирация мала.

В очень сухую погоду, при недостаточной влажности почвы днем, суточный ход транспирации несколько иной, а именно: перед полуднем устьица закрываются из-за недостатка влаги, что определяет минимум транспирации в эти часы. Ослабление транспирации способствует устранению дефицита влаги в клетках растения, и к вечеру устьица вновь открываются. Таким образом, при засушливой погоде появляется второй максимум транспирации, который по величине обычно меньше первого.

Способность растений регулировать расход воды на транспирацию проявляется только при температуре не выше 35—40°. При более высоких температурах устьица не закрываются, растения быстро теряют влагу и могут погибнуть. Кроме того, процесс транспирации находится в прямой зависимости от возраста растений. С возрастом растений меняются коллоидно-химические свойства плазмы и ее проницаемость. По мере старения растений с уменьшением проницаемости тканей понижается подвижность воды, уменьшается водоотдача клеток и снижается интенсивность испарения. Следовательно, при тех же самых метеорологических условиях транспирация стареющих растений меньше, чем молодых.

#### Потребность сельскохозяйственных растений во влаге Понятие о критических периодах

Для оценки обеспеченности растений влагой необходимо иметь сведения об их потребности во влаге и о наличии влаги в почве, т. е. о влажности почвы.

Растения в процессе своего развития потребляют большое количество воды. Одновременно вода испаряется с поверхности почвы. Суммарный расход воды на транспирацию и испарение с поверхности почвы принято называть суммарным испарением. Под потребностью культуры во влаге понимается расход воды сообществом растений на суммарное испарение при неограниченном подтоке влаги к корневой системе. Она зависит как от метеорологических условий, так и от биологических особенностей самой культуры, возраста растений, уровня агротехники.

В ряде исследований суммарная потребность растений во влаге за вегетационный период определяется с помощью использования коэффициента транспирации, а именно:

$$E_{\tau} = K \cdot U, \quad (8)$$

где  $E_t$  — потребление растением воды на транспирацию;  $У$  — величина урожая;  $K$  — коэффициент транспирации, т. е. количество воды, затраченное для образования одной весовой единицы абсолютно сухой массы урожая ( $K = \frac{E_t}{У}$ ). Коэффициент транспирации у влаголюбивых культур больше, у засухоустойчивых меньше, что видно из табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты транспирации различных сельскохозяйственных культур			
Культура	Коэффициент транспирации	Культура	Коэффициент транспирации
Пшеница . . . . .	217—755	Горох . . . . .	259—782
Подсолнечник . . . . .	290—705	Картофель . . . . .	167—659
Просо . . . . .	162—447	Кукуруза . . . . .	174—406
Гречиха . . . . .	363—646	Сахарная свекла . . . . .	227—670
Бобы . . . . .	209—736	Хлопчатник . . . . .	350—1651

Коэффициенты транспирации для основных сельскохозяйственных культур получены в лабораторных условиях, не отражающих всего разнообразия полевых условий, что затрудняет их использование в практических расчетах. То же можно сказать и о коэффициенте водопотребления  $K_1$ , представляющем собой частное от деления всего расхода воды (транспирация + испарение с почвы) на урожай всей органической массы с поля. Расход воды на транспирацию, вычисленный с помощью этих коэффициентов, при заданном урожае в разных географических районах оказывается одинаковым, так как они не учитывают роли климата в процессе транспирации, а также влияния метеорологических условий, изменяющихся от года к году в данном пункте. Однако, одно и то же растение, выращиваемое в разных районах, требует разного количества влаги в зависимости от климатических и погодных условий, уровня агротехники, плодородия почвы и сорта растений. По данным А. М. Алпатьева, ранние зерновые культуры в лесной зоне за вегетационный период расходуют около 200 мм, а в зоне сухих степей на поливе — около 400 мм.

Другой подход к оценке потребности растений во влаге имеется в работах того же А. М. Алпатьева, а также в работах Р. Э. Давида, А. В. Процерова и др. Ими установлена связь между валовым расходом воды растениями (транспирация + испарение с поверхности почвы) при оптимальной влажности и испаряемостью в лесной, степной и пустынных зонах (на поливе) СССР. Под испаряемостью понимают максимально возможное испарение при неограниченных запасах влаги в корнеобитаемом слое. Действи-

тельно, при достаточной влажности почвы расход воды растениями на транспирацию в основном определяется иссушающей способностью воздуха. Поэтому хотя качественно испарение с суши и транспирация — различные процессы, но количественно они лимитируются энергетическими ресурсами района, а значит, близки друг к другу. Следовательно, в среднем за вегетационный период валовый расход воды растениями при оптимальной влажности почвы близок к сумме испаряемости за тот же период. Коэффициент корреляции этих величин 0,92—0,98.

Величина испаряемости зависит от комплекса метеорологических условий (факторов), главными из которых являются: радиационный баланс увлажненной поверхности почвы, интенсивность турбулентного обмена, температура воздуха и испаряющей поверхности, влажность воздуха. Методы расчета испаряемости, применяемые в современной агрометеорологии, основаны на зависимости ее величины от одного или нескольких указанных факторов. Эти методы можно разделить на четыре группы:

- 1) методы определения испаряемости по температуре воздуха;
- 2) методы определения испаряемости по дефициту влажности воздуха;
- 3) метод определения испаряемости по радиационному балансу;
- 4) методы определения испаряемости по тепловому или водному балансам.

Методы первой группы основаны на зависимости испаряемости от среднегодовой температуры воздуха или температуры теплого периода. Поскольку процесс испарения в большей степени определяется температурными условиями, то связь получается устойчивой. В некоторых методах в качестве характеристики испаряемости используются суммы активных или эффективных температур за теплый период. Из методов этой группы в СССР наиболее часто применяется метод Г. Т. Селянинова, который получил следующую зависимость:

$$E_0 \approx \frac{\Sigma t_{>10}}{10}, \quad (9)$$

где  $E_0$  — испаряемость;  $\Sigma t_{>10}$  — сумма температур за период с температурой выше  $10^\circ$ .

В СССР и за рубежом используются десятки различных методов второй группы. В последнее время наиболее широкое распространение получила следующая формула А. М. Алпатьева, полученная им в результате исследования водного баланса корнеобитаемого слоя почвы при достаточном увлажнении:

$$E_0 = 0,65 \Sigma d, \quad (10)$$

где  $\Sigma d$  — сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха (в мм) за вегетационный период; 0,65 — среднее значение эмпирического коэффициента.

3 К третьей группе следует отнести способ расчета испаряемости по радиационному балансу, предложенный М. И. Будыко. При достаточной влажности почвы радиационная энергия, поглощенная поверхностью почвы и растениями, расходуется в основном на испарение и в значительно меньшей мере на нагревание почвы. Турбулентный теплообмен с атмосферой в этих условиях очень мал и при достижении испарением максимальной величины близок к нулю. В связи с этим формула расчета испаряемости имеет следующий вид:

$$E_0 = \frac{R_0 - B}{L}, \quad (11)$$

где  $R_0$  — радиационный баланс увлажненной поверхности;  $B$  — поток тепла в почву;  $L$  — скрытая теплота испарения.

В последнее время все более широкое применение находят методы расчета испаряемости, в которых она определяется не по значениям одного—двух метеорологических элементов, а как функция комплекса факторов, входящих в уравнение теплового или водного баланса деятельной поверхности (четвертая группа методов). Из методов этой группы следует указать комплексный метод М. И. Будыко и метод Д. Л. Лайхтмана и И. Г. Горбуновой.

4 Комплексный метод определения испаряемости основан на использовании уравнения теплового баланса. Как указывает М. И. Будыко, испаряемость, т. е. величину потенциально возможного испарения с оптимально увлажненной поверхности суши, когда транспирация и испарение с почвы определяется только внешними факторами, можно определить из следующего выражения:

$$E_0 = \rho \cdot D (q_s - q), \quad (12)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха;  $D$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $q_s$  — удельная влажность водяного пара при температуре подстилающей поверхности;  $q$  — удельная влажность водяного пара в воздухе.

Значения  $q_s$  можно определить из уравнения теплового баланса, которое записывается в виде

$$R_0 - B = L \rho D (q_s - q) + (4 \delta \sigma t^3 + \rho c_p D) (t_s - t), \quad (13)$$

где  $R_0$  — радиационный баланс увлажненной поверхности;  $B$  — теплообмен подстилающей поверхности с нижележащими слоями почвы;  $L$  — теплота парообразования;  $\delta$  — коэффициент, характеризующий свойства излучающей поверхности;  $t$  — температура

воздуха;  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $t_s$  — температура подстилающей поверхности;  $c_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Подставляя численные значения  $L$ ,  $\rho$ ,  $D$ ,  $\sigma$ ,  $c_p$  и переходя от  $q$  к  $e$ , для летних условий и для  $D=0,63$  см/сек, а для  $\rho=1,293 \times 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>, можно получить расчетные формулы:

$$E_0 = 1,67 (e_s - e); \quad (14)$$

$$R_0 - B = 1,0 (e_s - e) + 0,8 (t_s - t), \quad (15)$$

где  $E_0$  — испаряемость в см/мес.;  $e$  — упругость водяного пара в воздухе в мм;  $e_s$  — упругость насыщения при температуре испаряющей поверхности в мм.

Применение комплексного метода в массовых агрометеорологических расчетах затрудняется некоторой его громоздкостью и необходимостью иметь данные по радиационному балансу и теплообмену в почве. Достоинством метода является то, что в нем используется комплекс метеорологических элементов, определяющих испаряемость.

В методе Д. Л. Лайхтмана и И. Г. Горбуновой приняты следующие условия:

1) при расчетах суммарного испарения влажность корнеобитаемого слоя поддерживается на оптимальном уровне;

2) суммарное испарение зависит главным образом от метеорологических условий, т. е. влияние внутренних факторов транспирации мало.

Суммарное испарение с оптимально увлажненного поля можно представить как сумму фактического испарения без орошения  $E'$  и дополнительного испарения  $\Delta E$ , возникающего в результате орошения. Тогда получим уравнение водного баланса в среднем за весь период вегетации:

$$\text{для неорошенного участка } E' = x' - f' + \Delta\omega', \quad (16)$$

$$\text{для орошенного участка } E_0 = x - f + \Delta E + \Delta\omega, \quad (17)$$

где  $E_0$  — суммарное испарение;  $x$  — осадки;  $\Delta\omega$  — изменение влагозапасов почвы;  $f$  — полный сток (поверхностный и грунтовый);  $\Delta E$  — норма орошения. Штрихами в формуле (16) отмечены величины, относящиеся к неорошенной территории.

Если предположить, что при орошении существенно не изменяется сумма осадков, то  $x = x'$ . Кроме того, при выборе оптимального способа полива, например при поливе дождеванием, заметно не меняется и величина стока, поэтому с некоторым допущением можно считать, что  $f = f'$ . Тогда из уравнений (16) и (17) следует, что

$$\overline{\Delta E} = E_0 - (x - f) - \Delta\omega = E - E' + \Delta\omega' - \Delta\omega, \quad (18)$$

Величина  $\bar{E} - E' = \Delta E$  характеризует дополнительное испарение, создаваемое в результате орошения. Следовательно,

$$\overline{\Delta E} = \Delta E - (\Delta \psi - \Delta \psi'). \quad (19)$$

Как следует из уравнения (19), оросительная норма  $\overline{\Delta E}$  расходуется на дополнительное испарение  $\Delta E$  и на изменение влагозапасов почвы. При этом суммарное испарение  $E_0$  равно

$$E_0 = E' + \Delta E. \quad (20)$$

Дополнительное испарение  $\Delta E$  зависит только от метеорологических условий и определение его сводится к расчету дополнительного переноса водяного пара от деятельной поверхности в воздух. Этот перенос зависит от разности концентраций водяного пара в поступающих на орошаемое поле воздушных массах и внутри растительного покрова, а также интенсивности турбулентного обмена.

Формула для определения  $\Delta E$  имеет вид

$$\Delta E = f_0 C(z) + F_0 D(z), \quad (21)$$

где  $f_0$  — разность между оптимальной и фактической относительной влажностью воздуха в растительном покрове;  $C(z)$  и  $D(z)$  — некоторые функции, зависящие от размеров орошаемого участка;  $F_0$  — величина, учитывающая радиационный баланс и интенсивность турбулентного перемешивания на неорошаемом участке и их изменения, вызванные орошением.

Для решения уравнения (21) авторами предложены номограммы, позволяющие довольно просто определить искомые величины. При этом фактическое испарение может быть определено одним из известных в метеорологии способов.

Чтобы получить надежные значения  $\Delta E$ , необходимо правильно подобрать исходный материал, а именно использовать данные, относящиеся к сугубо пустынным станциям, расположенным не ближе 2—3 км от орошаемых полей.

Как показала сравнительная оценка описанных методов расчета испаряемости, в условиях климата умеренных широт результаты расчета  $E_0$  этими методами получаются близкими.

При анализе фактических данных о потреблении воды растениями в отдельные периоды (фазы, стадии, декады) отмечаются существенные отклонения их от величины испаряемости за те же периоды, а именно: фактическое потребление воды растениями, определенное из уравнения водного баланса корнеобитаемого слоя в отдельные межфазные периоды, оказывается больше или меньше испаряемости. Ниже представлены величины отношения валовых расходов воды к испаряемости для яровых злаковых культур по данным А. М. Алпатьева:

Декады, считая от даты всходов . . .	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициенты биологической кривой яровых зер- новых хлебов . . .	0,83	0,94	1,06	1,10	1,18	1,09	1,05	0,90

Причиной изменения отношения валового расхода воды к испаряемости в разные периоды развития растений А. М. Алпатьев считает наличие наследственных свойств у растений, которые он назвал «ритмами развития». Как видно из приведенных данных в начале вегетации у зерновых культур потребление воды в полевых условиях обычно меньше испаряемости, так как хотя транспирационная способность растений велика соответственно молодому возрасту растений, но мала растительная масса. К моменту образования основных органов растений\* и большой зеленой массы потребление воды превышает испаряемость. Это продолжается до начала массового отмирания листьев, когда растение уже снижает свою транспирационную способность. Отношения, приведенные выше, дают представление о так называемой биологической кривой потребности растений во влаге.

Вследствие влияния «ритмов развития» на процесс транспирации, численный коэффициент в формуле А. М. Алпатьева (10) меняется в довольно широких пределах, отражая биологические особенности сельскохозяйственных культур (табл. 5).

Чтобы получить представление о потребности растения во влаге, необходимо суммы испаряемости за декаду или межфазный период умножить на соответствующий биологический коэффициент, или, иначе, экологическую кривую (испаряемость) совместить с биологической. Полученные таким образом количественные показатели потребности растений во влаге в отдельные периоды жизни позволяют построить общую кривую потребления воды растениями. Вид этой кривой потребления воды растениями зависит от совпадения или несовпадения биологической и экологической кривых. При совпадении кривых по времени они накладываются друг на друга. Это имеет место у ранних культур (ячмень, овес, пшеница). Кривая получается крутой, с четко выраженным максимумом (рис. 6). Несовпадение кривых способствует более плавному ходу кривой потребности во влаге по фазам и стадиям (хлопчатник). В результате всего вышесказанного кривые валового потребления воды растениями даже при оптимальной влажности отличаются для разных видов и сортов растений, а также в разных климатических районах. У зерновых в результате совпадения экологической и биологической кривых (яровая пшеница, просо) кривая потребности во влаге довольно крутая, хотя за счет различия климатических условий она может быть и более плавной (Средний Урал). Кривые потребности во влаге корнеплодов и картофеля

Значения коэффициентов в формуле А. М. Алпатьева для Северо-Запада ЕТС

Месяц	Декада	Культура			
		озимая рожь	клевер одноукоусный	картофель	овес
Май	1	0,40	0,39	—	—
	2	0,44	0,47	—	—
	3	0,57	0,51	—	0,54
Июнь	1	0,60	0,56	—	0,58
	2	0,65	0,60	0,48	0,63
	3	0,63	0,63	0,51	0,68
Июль	1	0,62	0,64	0,58	0,71
	2	0,60	0,49	0,65	0,67
	3	0,53	0,50	0,71	0,63
Август	1	0,47	0,51	0,73	0,60
	2	—	0,52	0,65	0,55
	3	—	0,55	0,59	0,51
Сентябрь	1	—	0,51	0,53	—
	2	—	—	—	—
Среднее		0,56	0,53	0,60	0,61

имеют более растянутые максимумы и характеризуются медленным спадом влагопотребления после максимума. То же имеет место и для хлопчатника. Однако все кривые характеризуются одним максимумом, асимметрично сдвинутым вправо. Максимум обычно наблюдается в период образования и формирования репродуктивных органов (цветка). В это время растения очень чувствительны к недостатку влаги.

П. И. Броунов установил, что недостаток влаги в почве в какой-либо календарный период неодинаково отражается на состоянии различных биологических групп растений. У растений имеется период критический по отношению к влаге. Недостаток влаги в критический период вызывает максимальное снижение урожая. Дефицит влаги в другие периоды снижает урожай, но в меньшей степени, чем в критический период. По данным Ф. Д. Сказкина, у разных растений критический период наступает в различные фазы развития:

Озимая рожь  
 Озимая пшеница  
 Яровая пшеница  
 Овес  
 Ячмень  
 Кукуруза  
 Подсолнечник  
 Хлопчатник  
 Бахчевые  
 Картофель  
 Томаты

Выход в трубку—колошение

Цветение — молочная спелость  
 Образование корзинки — цветение  
 Цветение — заложение коробочек  
 Цветение — созревание  
 Цветение — формирование клубней  
 Завязывание плодов — созревание

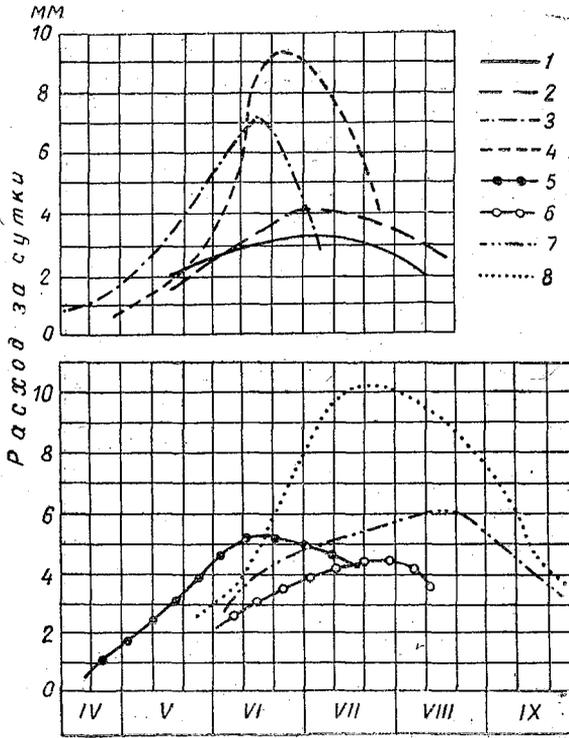


Рис. 6. Кривые валового потребления воды растениями при оптимальной влажности почвы:

1 — овес в Ленинградской области; 2 — яровая пшеница на Среднем Урале; 3 — яровая пшеница на Северном Кавказе; 4 — просо в Приаралье; 5 — картофель на Среднем Урале; 6 — картофель на Украине; 7 — капуста кочанная на Украине; 8 — хлопчатник в Средней Азии.

При рассмотрении этих данных можно сделать вывод о том, что для зерновых культур особенно важны осадки первой половины лета. Корнеплоды и картофель, наоборот, очень чувствительны к недостатку влаги в период репродуктивного развития, т. е. в момент формирования урожая. У различных сортов одного и того же вида растений критическими могут быть иные периоды развития.

### Влагообеспеченность сельскохозяйственных культур

Достаточное обеспечение влагой сельскохозяйственных культур является непременным условием получения высоких урожаев. Как уже указывалось выше, потребность растений во влаге в различные периоды их жизни неодинакова. С. А. Вериго установила, что в период появления всходов зерновых культур на черноземных суглинках растения развиваются удовлетворительно при запасах продуктивной влаги в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, равных 15 мм. При влажности почвы, близкой к наименьшей полевой влагоемкости, развитие растений происходит наиболее интенсивно. Средние за декаду запасы продуктивной влаги в пахотном слое меньше 5 мм не обеспечивают появления всходов.

В период кущения удовлетворительное развитие растений обеспечивается при наличии 30 мм продуктивной влаги в почве. Запасы влаги, равные 20 мм, уже недостаточны, и состояние растений ухудшается.

По данным С. А. Вериго, в критический период для нормального развития зерновых культур в слое суглинистых почв толщиной 100 см должно содержаться не менее 80 мм продуктивной влаги. Хорошее развитие имеет место при запасах продуктивной влаги в 100-сантиметровом слое, равных 100—200 мм, т. е. 60—100% полевой влагоемкости.

Потребность в воде после цветения значительно снижается, однако, резкое уменьшение почвенной влаги может привести к снижению и ухудшению качества урожая. При запасах влаги в 100-сантиметровом слое более 40 мм последние фазы развития зерновых культур протекают удовлетворительно. Уменьшение влажности почвы до 25 мм и ниже отрицательно сказывается на урожае, вызывая снижение абсолютного веса зерна. Увеличение влажности в 100-сантиметровом слое почвы до 125 мм продуктивной влаги сопровождается ухудшением состояния посевов, способствуя полеганию хлебов и развитию грибковых заболеваний.

Под влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур понимают степень их обеспеченности влагой. Для оценки влагообеспеченности прибегают к косвенным показателям, в частности, к расчету коэффициента увлажнения, который представляет собой от-

ношение суммы осадков за вегетационный или межфазный периоды к суммарному испарению при оптимальной влажности почвы (испаряемости) и рассчитывается по формуле

$$K = \frac{x}{\Sigma E_0}, \quad (22)$$

где  $K$  — коэффициент увлажнения;  $x$  — сумма осадков за год, вегетационный или межфазный периоды;  $\Sigma E_0$  — сумма испаряемости за тот же период, являющаяся характеристикой потребности растений во влаге.

В последнее время в работах А. П. Федосеева, Н. Г. Грибковой помимо осадков вегетационного периода учитывается также запас продуктивной влаги в 100-сантиметровом слое почвы перед посевом (Н. В. Бова, Н. Г. Грибкова) или в момент наступления максимального травостоя (А. П. Федосеев). Тогда формула для расчета коэффициента увлажнения приобретает вид

$$K = \frac{\omega_n + x}{\Sigma E_0}, \quad (23)$$

где  $\omega_n$  — запас продуктивной влаги в 100-сантиметровом слое почвы перед посевом.

В работах Г. Т. Селянинова суммарный расход воды на испарение оценивается по сумме температур, и отношение (22) получило название гидротермического коэффициента (ГТК).

Влагообеспеченность сельскохозяйственных культур заметно меняется от года к году. По данным Н. Г. Грибковой, коэффициент увлажнения на полях Кубанской опытной станции, занятых среднеспелыми сортами кукурузы, меняется в широких пределах, что в большой степени определяет колебания урожая этой культуры (табл. 6).

Таблица 6

Обеспеченность влагой кукурузы за вегетационный период

Параметры	Г о д ы														Среднее многолетнее
	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	
$K$	0,49	0,75	1,29	0,64	0,77	1,34	0,69	0,98	0,55	0,92	0,40	0,89	0,49	1,29	0,82
Урожай от среднего многолетнего, %	—	104	133	100	—	135	108	108	—	108	94	113	104	148	100

Почвенная влага играет очень важную роль в жизни растений. Однако не все виды почвенной влаги одинаково усваиваются растительным организмом. Процесс усвоения воды корневыми волосками зависит от многих причин, в том числе от физического состояния воды, степени ее связанности с почвенными частицами, дисперсности почвы (наличия в почве мельчайших пор и отверстий, обуславливающих огромную поверхность взаимодействия воды с почвой). Почвенная влага как бы вкраплена в поры почвы, отдельные элементы ее часто не связаны друг с другом. Кроме того, вода в почве содержит в себе ионы различных веществ, что определяет неоднородность физических и химических ее свойств, отличающих ее от обычной воды, когда она находится в массе. Вода бывает в почве в твердом, парообразном и жидком состояниях.

*Твердая влага* образуется в почве при температуре 0° и ниже в зависимости от концентрации растворов. Некоторая часть воды переходит в лед при сравнительно низкой температуре. Поэтому в зимних условиях в почве кроме льда всегда имеется жидкая вода. Молекулярные силы в замерзшей воде достигают десятков тысяч атмосфер, поэтому непосредственно в процессе водоснабжения растений лед участия не принимает.

*Парообразная влага* непосредственно растениями не усваивается. Однако она играет большую роль в процессе водоснабжения растений. Поры почвы заполнены водяным паром, который перемещается в насыщенном воздухе из мест более влажных (с большей упругостью водяного пара) в места менее влажные (с меньшей упругостью водяного пара). Следовательно, направление движения водяного пара определяется суточным и годовым ходом температуры и влажности почвенного воздуха.

*Жидкая вода* пребывает в почве в разных состояниях, которые принято называть категориями. Выделяют три категории воды в почве: связанную, капиллярную и гравитационную.

1. *Связанная вода*. Удерживается на поверхности почвенных частиц силами молекулярного сцепления, которые обычно велики и зависят от толщины слоя воды. Энергия связи уменьшается пропорционально величине  $\frac{1}{r^3}$  ( $r$  — удаление от поверхности почвенной частицы). При наличии на поверхности почвенной частицы очень тонкого слоя воды (с толщиной в несколько молекул) возникают огромные силы, так как каждая молекула воды, осевшая на почвенной частице, связана с ее поверхностью силой от 50 до нескольких тысяч атмосфер. Силы сцепления так велики, что по своим свойствам эта вода близка к твердому телу, а перемещается она только переходя предварительно в водяной пар. Плот-

ность её колеблется от 1,4 до 1,7 г/м<sup>3</sup>, теплоемкость равна 0,5 кал/г·град, температура замерзания составляет —4,0°. Эта вода, по терминологии А. А. Родэ, называется прочносвязанной. Тяжелые высокодисперсные почвы содержат значительно больше прочносвязанной воды, чем почвы, состоящие из крупных частиц. Верхним пределом содержания прочносвязанной воды является максимальная гигроскопичность, т. е. наибольшее количество влаги, которое может поглотить почва из насыщенного воздуха в силу своей гигроскопичности. Прочносвязанную воду из-за огромных сил сцепления ее с почвой растения не усваивают. По мере утолщения слоя молекула свойства связанной воды меняются. Внешние слои воды удерживаются меньшими силами, чем внутренние, силы сцепления уменьшаются до 10—50 атмосфер. Такая вода называется рыхлосвязанной. Она образует вокруг почвенных частиц пленку (пленочная вода) толщиной в несколько десятков молекул воды. По своим физическим свойствам пленочная вода отличается от обычной воды в массе. Плотность ее 1,25 г/см<sup>3</sup>, а температура замерзания составляет —1,5°, —4,0°. Пленочная вода может перемещаться из мест с толстой пленкой в места с более тонкой пленкой. Этот вид влаги частично может усваиваться растениями, если силы сцепления меньше осмотического давления в корнях растений.

2. Капиллярная вода. Это вода, удерживаемая в почве менисковыми силами (силами поверхностного натяжения). Почва имеет густую сеть капилляров, вмещающих большое количество капиллярной влаги. В одних случаях капилляры могут быть полностью заполнены водой, а в других кроме воды в них присутствует воздух. В том случае, когда влага покрывает почвенные частицы, оставляя внутри капилляра свободное пространство, она называется водой открытых капилляров. Она удерживается в почве силами 0,5—50 атмосфер и замерзает при температуре от —1,5 до —0,1°. Постепенно утолщаясь, слой воды полностью закрывает капилляры, и почва переходит в состояние капиллярного насыщения (вода закрытых капилляров). Вода в этом случае удерживается силами 0,5—50 атмосфер и меньше, и замерзает при температуре 0°. Оба вида почвенной влаги усваиваются растениями и составляют основной запас воды, поглощаемый растениями. Если вода в капиллярах не соединяется с грунтовой водой, ее называют капиллярно подвешенной. В случае, когда капиллярная вода соединяется с грунтовой (т. е. как бы подпирается ею), используют термин капиллярно подпертая вода. Капиллярная вода движется от более влажных мест к более сухим и поэтому играет огромную роль в водоснабжении растений.

3. Гравитационная вода. Содержится в порах сверх капиллярной воды и перемещается под влиянием силы тяжести вниз.

Эта влага не связана непосредственно с частицами почвы и по своим свойствам не отличается от свободной воды в массе. Роль гравитационной воды в водоснабжении растений невелика, так как она удерживается в слое недолго, непосредственно после выпадения осадков или таяния снежного покрова.

#### Влажность почвы и методы ее определения

Содержание воды в почве заметно меняется в течение года. Поэтому за величиной влажности систематически ведутся наблюдения. Количество влаги в почве (влажность) выражают в процентах веса сухой почвы, в процентах ее объема или в миллиметрах толщины слоя воды. Методы полевых инструментальных определений влажности почвы можно разделить на прямые и косвенные. Прямыми методами измеряется непосредственно количество имеющейся в почве воды. Косвенными методами влажность учитывается путем определения тех или иных физических свойств почвы, зависящих от степени ее увлажнения.

Прямой метод определения влажности — *метод сушки образцов почвы* — является основным на сети гидрометеостанций. В основе метода — определение количества воды, имеющейся в почве, путем высушивания образцов почвы. Этот метод предусматривает измерение всего количества содержащейся в почве воды — суммы почвенной влаги всех категорий. Вынутый из почвы образец взвешивается. Затем он при температуре 100—105° высушивается в термостате до постоянного веса. Температура выше 100° необходима для отделения связанной воды. Разность в весе образца до и после высушивания характеризует количество воды, содержащейся в почве. Расчет влажности ( $W\%$ ) производится по формуле

$$W\% = \frac{(P_1 - P_2) \cdot 100}{P_2}, \quad (24)$$

где  $P_1$  — вес образца до высушивания;  $P_2$  — вес образца после высушивания.

Выемка образцов производится буром специальной конструкции последовательно через каждые 10 см в слое почвы от 5 до 100 см. Каждая проба помещается в сушильный стакан, имеющий свой номер, и высушивается в термостате в течение 6—12 часов в зависимости от типа почвы. Взятие образцов производится на участках, где ведутся остальные агрометеорологические наблюдения. Определение влажности производится в четырехкратной повторности. Ввиду трудоемкости метода определение влажности почвы производится один раз в декаду (в конце декады). При орошении сроки определения влажности почвы должны обеспечить возможность расчета сроков и норм полива. После обработки дан-

ные четырех повторностей осредняются. В системе Гидрометеорологической службы Советского Союза ведутся регулярные наблюдения над влажностью почвы на 1650 гидрометеорологических станциях.

Косвенные методы определения влажности имеют ряд преимуществ по сравнению с прямыми. Измерения влажности с помощью датчиков позволяют вести наблюдения в одной точке систематически, что дает возможность проследить динамику влажности. Большое преимущество этих методов — малая их трудоемкость. Однако точность определения влажности при этом меньше, чем прямым методом. Из косвенных методов следует отметить следующие.

*Метод, основанный на тепловых свойствах почвы.* Здесь используются в качестве показателей теплоемкость и теплопроводность почвы. В основу одного из вариантов этого метода положена зависимость теплоемкости почвы от ее влажности. Известно, что удельная теплоемкость большинства почв в сухом состоянии составляет примерно  $0,2 \text{ кал/г}$ , а воды —  $1 \text{ кал/г}$ . С увеличением влажности удельная теплоемкость растет. Метод обладает малой чувствительностью и пока не получил широкого распространения. Принцип прибора для измерения влажности почвы по теплопроводности заключается в том, что теплопроводность почвы также зависит от содержания в ней влаги. Этот прибор дает хорошие результаты при низкой влажности почвы, при большом влагосодержании чувствительность его резко падает.

*Омический метод.* Основан на определении возрастания электрического сопротивления почвы с уменьшением ее влажности. Приемная часть прибора, разработанного А. И. Данилиным, представляет собой два электрода, погруженные в почву. Омическое сопротивление датчиков меняется в зависимости от влажности почвы между электродами. В СССР и за рубежом имеется ряд вариантов такого прибора. Недостатком метода является ненадежность показаний прибора при малой влажности почвы. Кроме того, требуется введение поправок на температуру почвы.

*Тензиометрический метод.* Основан на измерении капиллярного натяжения с уменьшением влажности почвы при помощи манометра, герметически соединенного с находящимся в почве и наполненным водой пористым сосудом. При уменьшении влажности почвы вода из сосуда уходит в почву через пористые стенки, образуется разрежение, и показания манометра увеличиваются, а при повышении влажности — уменьшаются. Приборы, созданные по этому принципу, — тензиометры — хорошо работают при высокой влажности и дают ненадежные результаты при низкой.

*Нейтронный метод.* Основан на измерении ослабления энергии нейтронов, происходящего в результате потери ими кинетической

энергии в рассеивающей среде. Значительная потеря кинетической энергии нейтронов, излучаемых радиоактивным источником, наблюдается при столкновении их с атомами малого атомного веса, какими, в частности, являются атомы водорода. Количество замедленных нейтронов пропорционально количеству свободного водорода в рассеивающей среде, а концентрация атомов водорода в почве зависит от ее влагосодержания. Этот способ разработан еще недостаточно. Одним из его недостатков является то, что приборы реагируют не только на свободные атомы водорода, но также на органические вещества, содержащие водород. Поэтому метод дает лучшие результаты в слоях почвы, бедных органическими веществами.

*Гаммаскопический метод.* Разработан А. И. Данилиным. Он основан на измерении ослабления гамма-лучей, проходящих через постоянный слой почвы. Слой почвы, находящийся между источником гамма-лучей и счетчиком гамма-квантов, ослабляет гамма-лучи на постоянную величину. Изменение показаний счетчика определяется различным содержанием воды в почве. Источником гамма-лучей служит радиоактивный изотоп кобальта  $Co^{60}$ . Прибор, созданный по этому принципу (М-30М), позволяет измерять влажность почвы во всем диапазоне от полного насыщения до сухого состояния.

Инструментальные определения влажности проводятся один раз в декаду и не могут достаточно полно отражать увлажнение почвы. Для получения большего материала о влажности почвы проводятся учащенные визуальные наблюдения над влажностью верхнего ее слоя, в основу которых положена связь физико-механического состояния почвы (консистенции) со степенью ее увлажнения. При этом влажность почвы оценивается по пяти градациям:

- 1) избыточно увлажненная — текучее состояние;
- 2) сильно увлажненная — липкое состояние;
- 3) хорошо увлажненная — мягкопластичное состояние;
- 4) слабо увлажненная — твердопластичное состояние;
- 5) сухая — твердое или сыпучее состояние.

#### Основные агрогидрологические свойства почвы

Для оценки обеспеченности влагой растений проводятся систематические наблюдения за влажностью почвы. Однако, как указывалось раньше, не вся имеющаяся в почве влага используется растениями. Растения могут поглощать лишь ту влагу, которая удерживается в почве силами, меньшими, чем сосущая сила корней. При определении доступного растениям количества воды на различных видах почвы используют агрогидрологические константы почвы. Агрогидрологические константы — это, — по данным С. А. Вериги и Л. А. Разумовой, — узловые точки,

в которых резко меняется поведение и свойства почвенной воды. В основу определения констант положены состояние почвенной воды и степень доступности ее для растений, а также некоторые физические свойства почвы. К агрогидрологическим константам следует отнести: полную, капиллярную и наименьшую полевую влагоемкости, влажность завядания, максимальную гигроскопичность, скважность почвы и др. При постепенном высыхании почвы возрастают силы, удерживающие влагу на почвенных частицах, и в момент, когда эти силы становятся больше осмотического давления в корневых волосках, растение перестает получать влагу. У культурных растений при этом происходит обезвоживание надземной части и они частично или полностью гибнут. Остающаяся в почве влага называется «мертвым запасом», бесполезным для растений. Практически «мертвый запас» соответствует содержанию прочносвязанной воды. Однако растения начинают испытывать недостаток влаги уже несколько раньше, чем в почве остается только прочносвязанная вода, когда присутствует еще и рыхлосвязанная. Влажность почвы, ниже которой жизнедеятельность растений не восстанавливается даже в воздухе, содержащем насыщенный водяной пар, называется влажностью устойчивого завядания. Так как влажность устойчивого завядания определяется малой подвижностью воды в почве, то она почти не зависит от вида культур, но меняется в зависимости от типа почвы (влажность завядания в процентах от веса абсолютно сухой почвы):

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

Влага, содержащаяся в почве при влажности выше влажности завядания, потребляется растениями и участвует в формировании урожая. Она называется продуктивной влагой. Максимальное количество влаги, которое способна удержать почва в полевых условиях, называется влагоемкостью. В зависимости от залегания водяного зеркала в почве различают полную, капиллярную и наименьшую полевую влагоемкость.

Полная влагоемкость — количество воды, содержащееся в почве в момент, когда зеркало грунтовой воды достигает поверхности и все почвенные поры заняты водой. Так же как и влажность почвы, полная влагоемкость выражается в процентах от веса абсолютно сухой почвы:

Песчано-подзолистая	20—25
Светло-серая лесная	25—30
Чернозем	30—45
Болотная	120—140

Капиллярная влагоемкость. С момента опускания уровня грунтовых вод часть почвенной влаги под действием силы тяжести просачивается вниз. В слое выше уровня грунтовых вод остается только капиллярная вода. Высота столба капиллярной воды, удерживаемой менисковыми силами, вычисляется по соотношению  $h = \frac{0,15}{r}$ , где  $r$  — радиус капилляра. По мере снижения уровня грунтовых вод все большее количество пор будет освобождаться от воды, и вода будет оставаться во все более мелких порах. Наконец, при достаточно глубоком залегании уровня грунтовых вод в верхних слоях почвы остается лишь влага открытых капилляров. Слой толщиной  $\frac{0,15}{r}$ , на который распространяется капиллярный подъем (капиллярная кайма), также перемещается за уровнем грунтовых вод. Количество почвенной влаги, содержащейся в капиллярной кайме, на различных высотах от уровня грунтовых вод различно. Наибольшее количество влаги, которое может удержать в себе почва над водным зеркалом, и называется капиллярной влагоемкостью почвы. Она, так же как и полная влагоемкость, выражается в процентах от веса абсолютно сухой почвы. Обычно капиллярная влагоемкость составляет 80—90% от полной. Мощность капиллярной каймы и влажность почвы в ней на одной и той же высоте от водного зеркала у разных почв различны. На глинистых почвах кайма выше, на песчаных ниже и меньше ее влажность. Исследованию этого вопроса посвящены работы А. Ф. Лебедева.

Наименьшая полевая влагоемкость — это максимальное количество воды, удерживаемое почвой над капиллярной каймой, когда нет прямого влияния грунтовых вод. В природе наименьшая полевая влагоемкость соответствует влажности почвы после обильного насыщения ее осадками и стекания избытка воды. При этом должно отсутствовать испарение и транспирация, а также увлажнение за счет почвенно-грунтовых вод. Среднее для корнеобитаемого слоя значение наименьшей влагоемкости для супесчаных почв составляет 10—15%, для легких суглинистых — 15—20%, среднесуглинистых — около 25%, глинистых 25—30%. Следовательно, для одного и того же типа почвы капиллярная влагоемкость больше наименьшей полевой, а полная больше капиллярной.

Агрогидрологические константы используются для определения запасов продуктивной влаги в почве,

## Продуктивная влага в почве

Как указывалось раньше, продуктивная влага присутствует в почве при влажности выше влажности завядания. Ее количество сильно колеблется в пространстве и во времени. Поэтому для оценки обеспеченности влагой растений раз в декаду проводятся измерения влажности почвы и вычисления запасов продуктивной влаги.

Количество продуктивной влаги обычно выражают в миллиметрах высоты слоя воды. Так как продуктивная влага — это разность фактической влажности и влажности завядания, то

$$w = v' - u', \quad (25)$$

где  $w$  — запасы продуктивной влаги в г;  $v'$  — влажность почвы в г;  $u'$  — влажность завядания в г.

Запасы влаги в почве и влажность завядания в справочной литературе и в материалах станций обычно представлены в процентах от веса сухой почвы, т. е.

$$v = \frac{v'}{P} \cdot 100, \quad (26)$$

$$u = \frac{u'}{P} \cdot 100, \quad (27)$$

где  $v$  — влажность почвы в %;  $u$  — влажность завядания в %;  $P$  — вес сухой почвы в г. Отсюда

$$w = \frac{P}{100} (v - u). \quad (28)$$

Заменяя вес сухой почвы произведением удельного веса и объема и принимая площадь поперечного сечения столба почвы равной  $1 \text{ см}^2$ , получаем

$$w = \frac{h \cdot d}{100} (v - u), \quad (29)$$

где  $h$  — высота слоя в см;  $d$  — объемный вес почвы в г/см<sup>3</sup>. Переведя влажность почвы из граммов в миллиметры слоя воды, будем иметь

$$w = 0,1 h \cdot d (v - u), \quad (30)$$

где  $w$  — запасы продуктивной влаги в почве в мм.

Вычисление запасов продуктивной влаги производится параллельно с вычислением общей влажности. Продуктивная влажность верхнего метрового слоя определяется как сумма влажностей 10-сантиметровых слоев. Верхним пределом содержания продук-

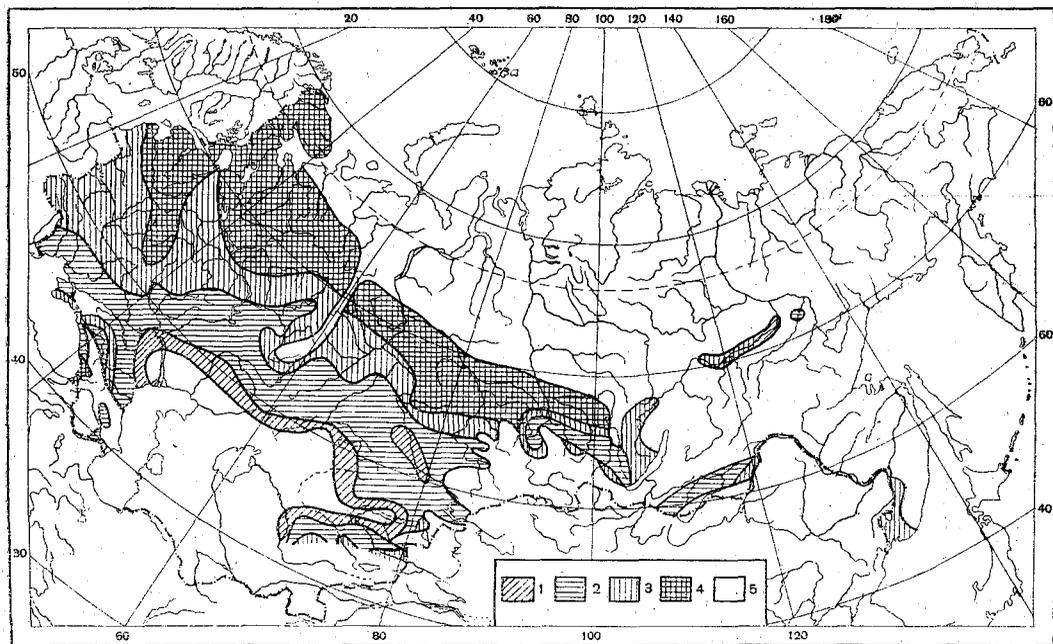


Рис. 7. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы под зябью ко времени наступления средней суточной температуры  $+5^{\circ}$  весной:

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.

тивной влаги в почве является влагоемкость. Поскольку как последняя, так и влажность завядания сильно зависят от типа почвы, то и предельное содержание продуктивной влаги меняется в зависимости от ее состава (табл. 7).

Таблица 7

Содержание продуктивной влаги в метровом слое различных почв при насыщении (мм)

Названия станций	Типы почв	При насыщении до влагоемкости		
		полной	капиллярной	наименьшей полевой
Белогорка	Дерново-слабоподзолистая суглиносупесь . . . . .	269	191	163
Полтава	Серый лесной суглинок . . . . .	357	248	190
Синельниково	Суглинистый чернозем на лессе . . . . .	362	235	179
Безенчук	Чернозем на легком суглинке	413	328	184
Херсон	Каштановая супесь . . . . .	384	316	170

Следовательно, наибольшие запасы продуктивной влаги при насыщении до полной влагоемкости свойственны черноземным и легким супесчаным почвам, наименьшие — бесструктурным глинистым. Распределение запасов продуктивной влаги в почве весной на территории Советского Союза представлено на рис. 7.

Водный баланс корнеобитаемого слоя почвы

Содержание продуктивной влаги в почве зависит от целого ряда процессов, связанных с приобретением влаги почвой или с ее расходом. Совокупность всех видов прихода и расхода влаги называется водным балансом почвы. Для сельскохозяйственного производства представляет интерес водный баланс корнеобитаемого слоя. У большинства культур корневая система располагается в слое почвы глубиной до 1—1,5 м. Даже у древесных растений, корневая система которых нередко располагается в слое до 5 м, наиболее активная часть корней лежит в верхнем слое почвы.

Основным источником почвенной влаги являются атмосферные осадки ( $x$ ). Однако не вся измеряемая осадкомером влага попадает в почву и используется растениями. Часть ее испаряется с поверхности растений или идет на их смачивание ( $x_p$ ), стекает на другие участки поля из-за неровностей и т. д. Степень увлажнения почвы осадками зависит от состояния почвы, ее физических

свойств, степени насыщения влагой, интенсивности выпадения осадков и других причин. Известно, что культурные почвы поглощают воду лучше, чем некультурные; сухая и рыхлая почва усваивает влаги больше, чем влажная и плотная. Ливневые осадки впитываются почвой в меньшей мере, чем обложные. Поэтому в уравнение водного баланса почвы следует включить не все осадки, определяемые по осадкомеру или по влагозапасам в снеге, а количество влаги, проникающее в почву ( $x_n$ ), которое носит название эффективных осадков. Биологическая эффективность осадков зависит от глубины их проникновения вглубь почвы. Осадки, смачивающие поверхностный слой, биологически неэффективны, так как не достигают корнеобитаемого слоя. В летний период растения используют в лесной зоне в среднем 80% выпавших осадков, в степной зоне — около 50% и менее. Накопление влаги за счет зимних осадков также неодинаково в разных природных зонах: в районах достаточного и избыточного увлажнения усваивается почвой не более 20—30% зимних осадков, в южных сухих зонах — не более 50%. Следовательно, биологически эффективными являются в среднем около 50% от общей суммы осадков.

В районах с неглубоким залеганием грунтовых вод влажность корнеобитаемого слоя существенно меняется под влиянием подтока капиллярной воды ( $M_r$ ). По данным С. А. Вериги и Л. А. Разумовой, пополнение корнеобитаемого слоя водой путем капиллярной подачи ее снизу происходит в тех случаях, когда глубина залегания водного зеркала от нижней границы корнеобитаемого 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. Дополнительными источниками запасов влаги корнеобитаемого слоя являются конденсация ( $\lambda$ ) и адсорбция ( $M_n$ ) водяного пара из воздуха. Однако, надежных данных, позволяющих оценить эту составляющую водного баланса количественно, нет. Поэтому этот источник влаги часто в расчетах не учитывается.

В изменении почвенной влажности принимает участие внутрипочвенная конденсация ( $M_b$ ). Этот процесс наблюдается в зимний период, когда водяной пар перемещается из глубоко лежащих теплых слоев в холодный корнеобитаемый слой. Летом, вследствие обратного соотношения температур, будет наблюдаться даже некоторая потеря влаги корнеобитаемым слоем. Однако, по мнению ряда авторов, роль этого процесса в обогащении влагой верхних слоев почвы невелика.

Расход влаги из корнеобитаемого слоя осуществляется разными путями. Часть выпавших осадков, не сумевшая просочиться в почву, под влиянием рельефа стекает в виде поверхностного стока ( $f_n$ ). В равнинных районах поверхностный сток с сельскохозяйственных полей мал. Он очень возрастает весной при таянии снеж-

ного покрова. По данным П. Г. Кабанова, в зависимости от степени увлажнения почвы, глубины и характера ее промерзания, а также наличия ледяной корки стекает от 1 до 98% всей талой воды. Просочившаяся в почву вода в свою очередь частично теряется в виде внутрипочвенного стока ( $f_b$ ), а часть ее ( $f_r$ ), достигает уровня грунтовых вод. Однако основной расход влаги осуществляется путем испарения ее с поверхности почвы ( $E$ ) и транспирации ( $T$ ). Таким образом, полный водный баланс корнеобитаемого слоя почвы может быть выражен следующим уравнением:

$$\omega_1 - \omega_0 = (x_n + M_r + M_n + M_b + \lambda) - (E_n + E_t + f_r + f_n + f_b), \quad (31)$$

где  $\omega_0$  и  $\omega_1$  — начальный и конечный запасы влаги в почве;  $x_n$  — эффективные осадки;  $M_r$  — приток влаги в почву из грунтовых вод;  $M_n$  — приток влаги за счет адсорбции;  $M_b$  — приток влаги за счет внутрипочвенной конденсации;  $\lambda$  — вода, поступающая в почву за счет конденсации парообразной влаги из воздуха;  $E_n$  — испарение влаги с почвы;  $E_t$  — потребление растениями воды на транспирацию;  $f_r$  — отток влаги из почвы в грунтовые воды;  $f_n$  — поверхностный сток;  $f_b$  — внутрипочвенный сток влаги.

Если исключить из уравнения (31) элементы водного баланса, для которых нет надежных методов измерения или расчета, то в упрощенном виде оно записывается так:

$$\omega_1 - \omega_0 = (x_n + M_r) - (E_n + E_t + f_r). \quad (32)$$

Решение этого уравнения имеет ряд трудностей, связанных с отсутствием данных о  $M_r$  и  $f_r$ . Поэтому в агрометеорологических расчетах часто используют более упрощенное выражение:

$$\omega_1 - \omega_0 = x_n - E_n - E_t. \quad (33)$$

#### Динамика запасов продуктивной влаги в почве

Запасы продуктивной влаги в почве заметно меняются в течение года в зависимости от изменения различных членов водного баланса корнеобитаемого слоя.

В теплый период основной процесс расходования влаги осуществляется за счет испарения и транспирации. Уже ранней весной вместе с накоплением запасов влаги при снеготаянии большое ее количество расходуется на испарение. В это время в связи с наличием мерзлоты, не пропускающей воду вглубь, верхний слой почвы сказывается насыщенным влагой, и испарение определяется лишь метеорологическими условиями. С оттаиванием почвы в районах сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод подпертая мерзлотой вода уходит вглубь. В районах ненасыщенных почв по мере оттаивания избыток воды в верхних слоях почвы идет на насыщение нижележащих слабо увлажненных слоев, ка-

капиллярное поднятие ослабляется и становится недостаточным для того, чтобы компенсировать потерю влаги на испарение: почва начинает подсыхать сверху.

С началом вегетации растений скорость расхода влаги возрастает. На расходовании влаги из почвы в это время начинает сказываться степень углубления и характер развития корневой системы, а также состояние надземной массы растений. В зоне высокого залегания грунтовых вод одновременно с этим происходит значительное уменьшение запасов влаги из-за углубления верхней границы капиллярной каймы. Изменение запасов почвенной влаги в течение вегетационного периода происходит различно в разных зонах. В районах сильного увлажнения и высокого стояния грунтовых вод максимальные расходы влаги наблюдаются в начале вегетационного периода вследствие опускания капиллярной каймы. В основном изменение запасов влаги происходит в верхнем 50-сантиметровом слое. В этой зоне различия в динамике запасов влаги на полях, занятых озимыми культурами, невелики (рис. 8). Лишь

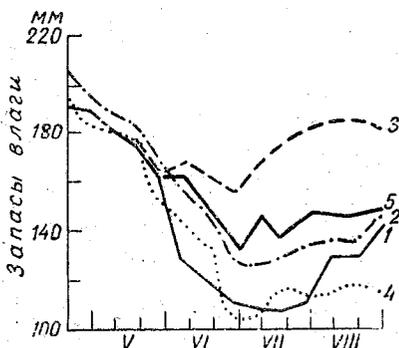


Рис. 8. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм) под различными культурами в зоне сильного увлажнения: 1 — озимая пшеница; 2 — яровая пшеница; 3 — чистый пар; 4 — клевер; 5 — картофель.

на чистом пару влажность почвы в течение всего теплого периода значительно выше, чем на полях, занятых сельскохозяйственными культурами. К осени различия сглаживаются. В районах глубокого залегания грунтовых вод, где капиллярный подток отсутствует, наименьшие количества влаги расходуются путем транспирации. Расходы достигают максимальных значений в репродуктивный период, особенно в период выхода в трубку — цветения, когда корневая система и надземная масса растений достигают максимальной мощности. В противоположность зоне высокого увлажнения влага из слоя 50—100 см расходуется так же интенсивно, как

из слоя 0—50 см. В этом случае интенсивность расхода влаги в большой степени зависит от вида и состояния произрастающей культуры.

Как видно из рис. 9, в зоне глубокого стояния грунтовых вод в начале вегетационного периода, пока еще мала транспирация, запасы влаги под всеми культурами и на чистом пару одинаковы

и составляют 160—165 мм. В дальнейшем появляются различия, которые становятся наибольшими (до 100 мм) в июле. Однако различий влажности на полях с озимой и яровой пшеницей в это время почти нет, так как оба вида культур к этому времени успевают израсходовать на транспирацию большое количество влаги. Следовательно, на ходе изменения запасов влаги под различными культурами отражаются особенности роста и развития этих культур. В связи с тем, что поздние культуры (кукуруза), в последующие месяцы продолжают интенсивно транспирировать, а расходы влаги как озимой, так и ранней яровой пшеницы уменьшаются, разница в запасах влаги под ними сглаживается и к концу августа составляет лишь 5 мм. На паровом поле в течение всего вегетационного периода запасы влаги остаются большими. В осенний период в связи с понижениями температуры и малыми расходами влаги на транспирацию и испарение запасы влаги начинают постепенно расти как на полях, занятых сельскохозяйственными культурами (озимые), так и на зяби. В зимние месяцы происходит более или менее интенсивное насыщение почвы влагой за счет осадков, проникновения в почву талых вод и путем внутри почвенного передвижения влаги при промерзании. В это время совсем отсутствует транспирация и очень мало испарение с почвы.

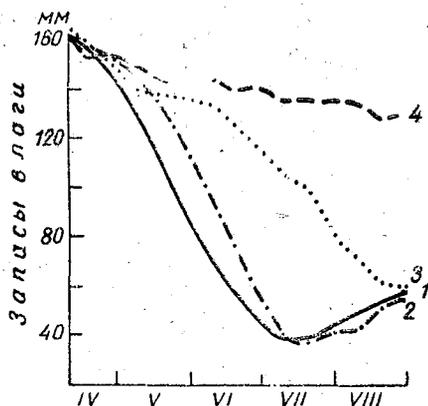


Рис. 9. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм) под различными культурами в зоне полного весеннего промачивания и глубокого стояния почвенно-грунтовых вод:

1 — озимая пшеница; 2 — яровая пшеница; 3 — кукуруза; 4 — чистый пар.

#### Агрогидрологические зоны СССР

Динамика влажности почвы в разных районах Советского Союза различна. На основе многолетних массовых наблюдений над влажностью почвы в различных почвенно-климатических зонах С. А. Вериго выделила четыре агрогидрологические зоны (рис. 10), отличающиеся особенностями годового хода запасов продуктивной влаги (рис. 11), а также степенью соответствия этих особенностей потребностям зерновых культур во влаге.

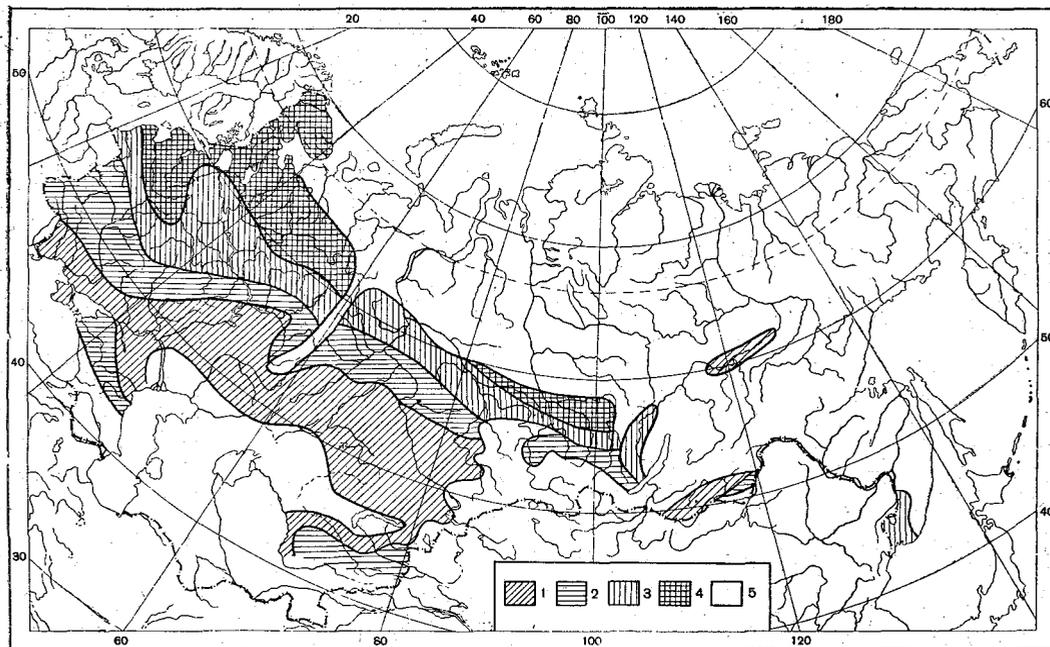


Рис. 10. Агрогидрологические зоны СССР.

- 1 — зона слабого весеннего промачивания; 2 — зона полного весеннего промачивания; 3 — зона капиллярного увлажнения; 4 — зона обводнения;  
 5 — районы горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы.

Зона обводнения охватывает районы с высоким стоянием грунтовых вод: Прибалтику, примыкающую к ней часть Белоруссии, северные и северо-западные районы Европейской территории Союза, таежные районы Западно-Сибирской низменности. В этих районах в момент максимальной высоты грунтовых вод водное зеркало входит в почвенную толщу, а иногда даже достигает

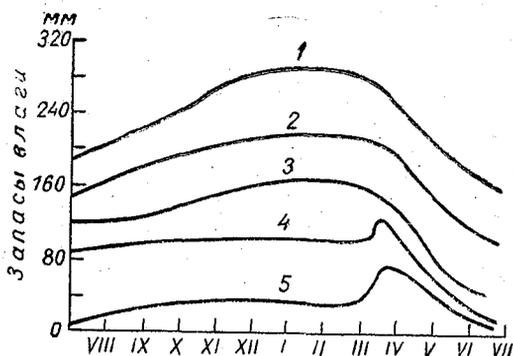


Рис. 11. Годовой ход запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под озимыми культурами, посеянными по чистому пару.

Типы: 1 — обводнения; 2 — капиллярного увлажнения; 3 — полного весеннего промачивания; 4 — слабого весеннего промачивания (засушливые районы); 5 — слабого весеннего промачивания (сильно засушливые районы).

поверхности почвы. Верхняя граница капиллярной каймы отрывается от поверхности почвы лишь на 2—3 летних месяца и даже на супесчаных почвах не уходит глубже 50 см. Зимой в мерзлом слое почвы идет огромное влагонакопление за счет подтягивания легкоподвижной влаги из грунтовых вод. Средний многолетний годовой максимум запасов продуктивной влаги, нередко превышающий полную влагоемкость, приближается к 300 мм и наблюдается в конце зимы. Весной, с оттаиванием почвы, избыток влаги сбрасывается. Весенние запасы становятся равными капиллярной влагоемкости почвы при данном уровне залегания грунтовых вод и колеблются около 250 мм. В теплую часть года, до тех пор пока верхняя граница капиллярной каймы не оторвется от поверхности почвы, потери на испарение и транспирацию компенсируются капиллярным поднятием, так что запасы влаги изменяются очень медленно. Как только капиллярная кайма начнет углубляться со-

ответственно изменению влагоемкости почвы, сразу возникают резкие потери влаги вследствие передвижения ее вниз под влиянием силы тяжести. Годовой минимум запасов влаги в верхнем слое почвы (0—50 см) опускается ниже ее наименьшей полевой влагоемкости, в слое 50—100 см он соответствует влагосодержанию капиллярной каймы. Во всем верхнем метровом слое, даже супесчаных почв годовой минимум запасов продуктивной влаги не опускается ниже 150 мм.

Следовательно, 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 почвенной влаги и нередко служит причиной полегания хлебов. Огромное количество воды, просачивающейся через почву, обуславливает вынос питательных веществ из корнеобитаемого слоя в грунтовые воды. В этой зоне эффективны мероприятия, направленные на регулирование уровня грунтовых вод и освобождение сельскохозяйственных полей от избытка влаги (осушение, дренаж и др.).

Зона капиллярного увлажнения охватывает территорию севернее линии Калининград — Ливны — Кудымкар — Тобольск — Кемерово. В этой зоне 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 поверхность. Зимний режим и годовой максимум запасов влаги в зоне капиллярного увлажнения близки к таковым в зоне 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 передвижения влаги в жидком состоянии в этих районах исключается в течение 2—2,5 летних месяцев: на суглинистых почвах — лишь в верхних слоях, на супесчаных — во всей метровой толще.

Наличие в почвах этой зоны легкоподвижной воды обычно обеспечивает большие запасы продуктивной влаги под озимыми и яровыми культурами в течение всего вегетационного периода. Осенью и весной почва бывает избыточно увлажнена, в связи с чем в это время года посевы могут страдать от избытка влаги. Следствие 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 го-

ды в течение 2—2,5 летних месяцев глубокого стояния почвенно-грунтовых вод и отсутствия верховодок посевы могут страдать от недостатка влаги, причем яровые чаще, чем озимые. В связи с избытком увлажнения в ранневесенний и позднесенний периоды на части территории этой зоны эффективны мероприятия по регулированию уровня грунтовых вод.

Зона полного весеннего промачивания простирается на юг от зоны капиллярного увлажнения до линии Черновцы — Харьков — Пермь — Оренбург — Кустанай — Ишим — Мариинск. Она охватывает районы глубокого залегания грунтовых вод, где капиллярная кайма не достигает корнеобитаемого слоя. Годовой максимум запасов продуктивной влаги здесь приходится на весну. Он равен наименьшей влагоемкости почвы. В метровом слое суглинистых почв он составляет 170—180 мм и лишь на мощных черноземах достигает 200 мм. Годовой максимум наблюдается к концу вегетации сельскохозяйственных культур и по многолетним данным колеблется в пределах 50—100 мм, а в отдельные годы может опускаться до нуля. Легкоподвижная влага закрытых капилляров имеется лишь весной над мерзлым слоем почвы, несущим водное зеркало просачивающихся талых вод.

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 и могут наблюдаться периоды острого недостатка влаги. Для озимых это возможно лишь в течение осенней вегетации, для яровых — на протяжении всего вегетационного периода. Поэтому в этой зоне всегда эффективны мероприятия по сохранению влаги на полях в теплую часть года.

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. Годовой максимум запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы здесь также наблюдается весной. Но даже в это время, по многолетним данным, запасы влаги метрового слоя значительно ниже его наименьшей влагоемкости, в наиболее же засушливых районах они составляют лишь 50—70 мм. Глубина промачивания почвы в отдельные годы не превышает 50 см. Годовой минимум запасов влаги наблюдается осенью и нередко падает до нуля. В течение всего года, исключая короткий период снеготаяния, почва здесь лишена легкоподвижной влаги. В зимнее время в условиях устойчивого промерзания внутривлажные передвижения влаги не играют существенной роли — мерзлые слои в течение всей зимы сохраняют свою влажность практически постоянной.

В этой зоне водоснабжение растений сильно ограничено, и периоды недостатка влаги являются обычными. Особенно часто острый недостаток влаги отмечается 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 этой зоне ограничивает глубину проникновения корней растений и тем самым снижает возможность использования имеющихся в глубоких слоях почвы питательных веществ.

Все мероприятия по восстановлению запасов влаги, израсходованной предшествующей культурой, и по сбережению влаги в теплую часть года в этой зоне достигают максимальной эффективности. Но обеспечить получение из года в год устойчиво высоких урожаев сельскохозяйственных культур здесь может только орошение.

Границы описанных зон в природных условиях не являются резко очерченными. Вследствие различий в рельефе, почвах, в гидрологических и микроклиматических условиях, а также вследствие деятельности человека (мелиорация и агротехника) зоны обводнения и капиллярного насыщения тесно переплетаются между собой. Еще теснее переплетаются зоны полного и слабого весеннего промачивания.

На распределение влаги по территории заметное влияние оказывает рельеф. Как правило, почва вогнутых форм рельефа оказывается более увлажненной, по сравнению с почвой выпуклых форм. При этом влажность почв вогнутых склонов, по данным А. П. Федосеева, в условиях Казахстана возрастает от вершины к подошве, а на выпуклых склонах, наоборот падает к основанию. При прочих равных условиях наиболее влажны северные склоны, затем идут восточные, западные и южные склоны. Северо-восточные склоны влажнее северо-западных, а юго-восточные влажнее

Таблица 8

Распределение средних запасов доступной влаги в слое почвы 0—60 см по рельефу мелкосопочника. Цуриковка-Кокчетавской области 1956 г.

Местоположение участка	Высота над уровнем моря, м	Уклон местности, градусы	Средние запасы влаги за май—август, мм
Вершина сопки . . . . .	505	—	49
Середина южного склона . . . . .	489	7	58
Подошва южного склона . . . . .	444	2	80
Середина северо-западного склона . . . . .	440	5	89
Ложбина южного склона . . . . .	479	15	106
Равнина (низина) . . . . .	425	1	118
Дуг . . . . .	433	0	182

юго-западных. Следовательно, наиболее сухими оказываются почвы вершин и склонов южной экспозиции (табл. 8).

При этом установлено, что максимальные различия в увлажненности почв проявляются во влажные годы или во влажные периоды отдельных лет. В это время разница в запасах влаги определяется только различием водно-физических свойств почв и формой рельефа.

## Глава II

### МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СРЕДИ РАСТЕНИЙ. ФИТОКЛИМАТ

#### § 1. Понятие о фитоклимате

Микроклимат нижнего слоя атмосферы обычно разделяют на две области, для которых характерны различные закономерности распределения метеорологических элементов. Границей этих областей (слоев) условно можно считать поверхность растительного покрова. В верхнем слое, где наблюдается свободная циркуляция воздуха, распределение метеорологических элементов подчиняется основным законам, сформулированным физикой приземного слоя атмосферы. В нижнем слое, расположенном ниже верхней границы растительного покрова, существуют своеобразные закономерности, определяемые жизнедеятельностью растений. Метеорологический режим в этом слое обычно называют фитоклиматом. Каждое сообщество растений создает свой фитоклимат, поэтому можно говорить, например, о фитоклимате картофельного поля или фитоклимате посевов пшеницы. В течение вегетационного периода фитоклимат отдельных сельскохозяйственных культур не остается постоянным. Он изменяется как под влиянием общих метеорологических процессов, так и в результате изменения состояния посевов, проведения агротехнических и мелиоративных мероприятий.

В течение вегетационного периода в зависимости от степени развития растений и густоты травостоя меняется положение «действительной поверхности», т. е. поверхности, непосредственно поглощающей солнечную радиацию и излучающей длинноволновую радиацию, отдающей тепло и влагу в атмосферу. При отсутствии растительного покрова действительной поверхностью является поверхность почвы. При несомкнутом растительном покрове, например, при возделывании пропашных культур (картофель, корнеплоды, виноградник) или при очень редком травостое культур сплошного сева, действительной поверхностью является как растительный покров,

так и поверхность почвы. Увеличение высоты растений, числа листьев и сомкнутости травостоя все в большей степени препятствует проникновению солнечной радиации к поверхности почвы. В результате этого процессы, которые происходили раньше у поверхности земли, теперь имеют место на некоторой высоте от нее, и деятельной поверхностью теперь становится поверхность растений. При сомкнутом травостое все части растений, освещенные солнцем, участвуют в поглощении радиации. При этом они могут располагаться на разных высотах от поверхности земли. В связи с этим большую роль в метеорологическом режиме внутри травостоя играет распределение по вертикали площади поверхности листьев и особенно положение слоя с максимальной площадью поверхности листьев и стеблей. Высота расположения этого слоя и его мощность определяют основные черты фитолимата, так как именно в этой части «дейтельного слоя» происходит наибольшее поглощение радиации, интенсивная транспирация и ослабление турбулентного обмена. По мере роста растений расположение слоя максимальной площади листьев меняется, он поднимается на большую высоту над поверхностью земли (рис. 12). Изменяется

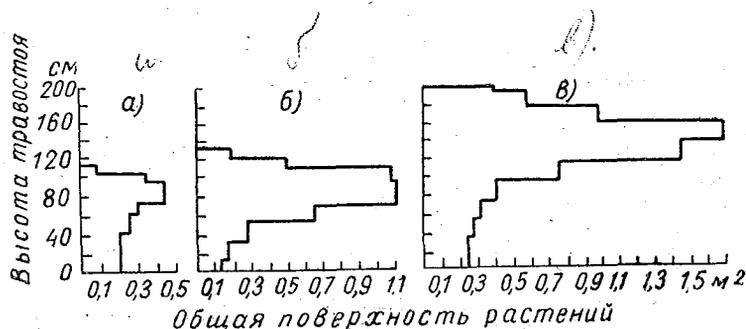


Рис. 12. Вертикальное распределение общей площади поверхности растений:

а — кукуруза 3/VIII 1963 г.; б — конские бобы 10/IX 1962 г.;  
в — белый донник 20/VIII 1962 г.

и распределение метеорологических элементов в слое растительного покрова, а также температура и влажность почвы под ним.

В среднем основная часть листьев располагается на высоте, равной  $\frac{1}{2}$  или  $\frac{2}{3}$  высоты растений. Следовательно, на этой высоте протекают основные процессы — поглощение солнечной радиации, транспирация, фотосинтез.

## § 2. Радиационный режим травостоя

Радиационный режим растительного покрова меняется в зависимости от высоты растений, их зеленой массы, ориентации листьев, фазы развития растений, высоты расположения листьев. При этом основную роль в непостоянстве радиационного баланса травостоя играет изменение притока и поглощения коротковолновой солнечной радиации.

Эксперименты, проведенные рядом исследователей — Ф. Ф. Давитая, Ю. С. Мельником, Т. А. Голубовой, П. П. Кузьминым, Е. А. Лопухиным и др., — показали, что по мере роста растений проникновение солнечной радиации к нижним частям растений уменьшается как вследствие роста отражательной способности растений, так и за счет большего поглощения радиации верхними частями растений. Альbedo сельскохозяйственных растений, по данным Б. М. Гальперин, проводившей опыты со злаковыми культурами, заметно меняется в процессе их развития. Как видно из рис. 13, по мере увеличения зеленой массы растений среднее аль-

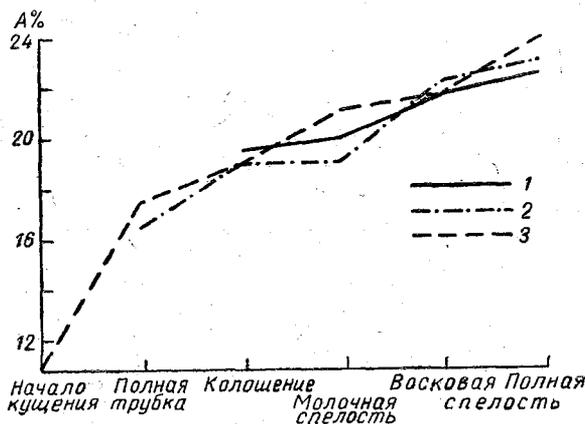


Рис. 13. Зависимость альбедо сельскохозяйственных растений от фазы их развития:

1 — озимая рожь; 2 — озимая пшеница;  
3 — яровая пшеница.

бедо поля быстро возрастает, особенно у яровой пшеницы. Если в фазу кущения альбедо яровой пшеницы составляет 11%, то в период колошения она отражает уже 18—19% падающей энергии, а в период созревания — до 25%. После уборки хлебов альбедо поля резко падает до 12—17%.

Ход изменения альбедо поля в зависимости от фаз развития растений у разных культур имеет много общего. Заметные разли-

чия наблюдаются лишь на ранних фазах и объясняются разницей в густоте травостоя культур, а также разными погодными условиями в эти фазы. Рост альbedo посевов на ранних фазах развития объясняется увеличением зеленой массы растения. В период созревания рост альbedo можно объяснить изменением состояния самих растений, т. е. начинающимся их высыханием и уменьшением количества хлорофилла. Связь оптических свойств листьев с содержанием в них воды впервые обнаружил Онгстрем, а затем подтвердили Н. Н. Калитин и др. По измерениям Онгстрема, в сырую погоду альbedo листьев составляет 19%, а после длительного сухого периода — 29%. Можно предполагать, что при измерении альbedo отдельных растений можно было бы обнаружить более сильное его увеличение при созревании. Подобные результаты получаются и при определении альbedo растений на орошаемых участках, в частности, на полях хлопчатника.

В зависимости от вышеперечисленных причин альbedo различных видов растительного покрова меняется в довольно широких пределах (табл. 9), иногда более чем в 2 раза.

Таблица 9

Альbedo различных видов растительного покрова

Вид растительного покрова	Альbedo, %	Вид растительного покрова	Альbedo %
Рожь и пшеница в различных фазах вегетации:		Древесная растительность:	
яровая пшеница . . . . .	10—25	вершины дуба . . . . .	18
озимая пшеница . . . . .	16—23	вершины сосен . . . . .	14
озимая рожь . . . . .	18—23	вершины елей . . . . .	10
Травяной покров:		Различные виды посевов и пропашных культур:	
высокий травостой, разросшийся . . . . .	18—20	хлопчатник . . . . .	20—22
зеленая трава . . . . .	26	люцерна (начало цветения) . . . . .	23—32
сухая трава . . . . .	19	рисовое поле . . . . .	12
		салат . . . . .	22
		свекла . . . . .	18
		картофель . . . . .	19

Различные части растительного покрова получают неодинаковое количество радиации. Наблюдения показали, что чем гуще травостой или больше листовая поверхность растений, тем меньше радиации получают нижние части растений и тем слабее в них протекает фотосинтез. Экспедиционные данные, полученные в 1953—1954 гг. Московским государственным университетом в Подмоскowie, показывают, что растительный покров может в некоторых случаях пропускать лишь 20—30% приходящей суммарной радиации (табл. 10).

Таблица 10

Суммарная солнечная радиация над травостоем на высоте 160 см  
и в травостое на высоте 10 см от поверхности почвы в полдень 18 VII 1954 г.

Место наблюдений	Суммарная радиация кал/см <sup>2</sup> мин	Процент
Над травостоем . . . . .	1,00	100
Пар чистый . . . . .	1,00	100
Картофельное поле . . . . .	0,68	68
Кукуруза квадратно-гнездовым способом . . . . .	0,50	50
Кукуруза—сплошной сев . . . . .	0,27	27
Пшеница яровая . . . . .	0,28	28
Просо . . . . .	0,26	26
Смеси трав . . . . .	0,18	18

Лес еще больше ослабляет солнечную радиацию. По данным З. И. Пивоваровой и Б. И. Гуляева, количество радиации, проникающей под полог леса, зависит от строения крон и степени их сомкнутости. В околополуденные часы под полог молодого леса в стадии полной листвы в условиях Ленинградской области проникает лишь 5—8% от радиации над кронами. С началом листопада «прозрачность» лесного полога увеличивается и после окончания листопада (октябрь) радиация в лесу составляет 20% от радиации над лесом. Измерения суммарной радиации в лесу на разных высотах от поверхности почвы показали, что в околополуденные часы примерно половина радиации (47%) проникает до уровня  $\frac{2}{3}$  крон. Наибольшее ослабление радиации происходит в нижней, наиболее густой части крон, где задерживается около 40% радиации. У основания крон проникающая радиация составляет 8% от радиации над лесом. Примерно такое же количество радиации поступает и к почве при отсутствии травяного покрова и подлеска.

В хвойном лесу, по исследованиям П. П. Кузьмина, около половины радиации проникает к середине крон, т. е. ослабление радиации в верхних частях лесного полога несколько меньше.

Таким образом, основные физиологические процессы, протекающие под влиянием лучистой энергии, имеют место в верхних слоях растительного покрова. Приведенные выше сведения относятся к горизонтальным поверхностям растений. Однако, листья могут иметь различную ориентацию. По данным Ю. Росса и З. Бихеле, при низких высотах солнца растениям более выгодна вертикальная ориентация листьев, а при больших высотах солнца, наоборот, выгоднее преимущественно горизонтальная ориентация листьев. В работах Ю. Росса и Х. Тооминга показано, что оптимальной является такая геометрическая структура растительного покрова, при которой листья в верхних слоях вертикальные, и наклон листьев постепенно изменяется с глубиной слоев до горизонтального в самом нижнем слое.

### § 3. Тепловой баланс поля

Микроклимат сельскохозяйственных полей формируется несколько иначе, чем микроклимат оголенной почвы. Помимо притока солнечной радиации, влажности и характера почвы, условий рельефа, микроклимат поля зависит от особенностей сельскохозяйственной культуры, фазы ее развития, густоты растительного покрова. Поэтому микроклимат соседних полей, занятых разными культурами, заметно различается. Как уже говорилось, микроклимат поля не остается постоянным в течение вегетационного периода, он изменяется по мере роста и развития растений. Известно, что потребность различных сельскохозяйственных культур в тепле и влаге в одни и те же календарные периоды неодинакова. У яровых зерновых культур критический период по отношению к воде имеет место в первую половину лета, когда они находятся в фазе кущения — колошения. Корнеплоды и картофель, наоборот, наиболее чувствительны к влаге в период репродуктивного развития, когда происходит формирование клубней. Эта особенность сельскохозяйственных растений находит свое отражение в соотношении величин элементов теплового баланса деятельной поверхности по периодам вегетации. Рассмотрим тепловой баланс полей, занятых этими культурами. Запишем уравнение теплового баланса поля.

$$R = LE + P + B, \quad (34)$$

где  $R$  — радиационный баланс поля за определенный период;  $LE$  — затраты тепла на суммарное испарение с поля за тот же период;  $P$  — затрата тепла на турбулентный теплообмен растительного покрова с атмосферой;  $B$  — теплообмен между деятельной поверхностью и лежащими ниже слоями почвы. При этом суммарное испарение может быть представлено в виде

$$E = E_{\tau} + E_{\text{п}}, \quad (35)$$

где  $E_{\tau}$  — расход воды в процессе транспирации растений;  $E_{\text{п}}$  — испарение с поверхности почвы. Поскольку величина  $B$  в летние месяцы значительно меньше  $LE$  и  $P$ , то основная часть радиационной энергии поля расходуется или на суммарное испарение, или на турбулентный теплообмен с атмосферой, что определяется временем наступления критического периода у сельскохозяйственных культур.

У зерновых культур (рис. 14) в первую половину вегетационного периода, когда у растений наблюдается критический период по отношению к влаге, при достаточной влажности почти  $\frac{2}{3}$  всего радиационного тепла расходуется на суммарное испарение. После цветения, когда вода зерновым культурам нужна уже в меньшем количестве, затраты тепла на испарение уменьшаются, и значи-

тельно возрастает турбулентный теплообмен растений с атмосферой.

Несколько иное соотношение элементов теплового баланса наблюдается у пропашных культур. По данным Ф. А. Муминова, суточные суммы элементов теплового баланса картофельного поля

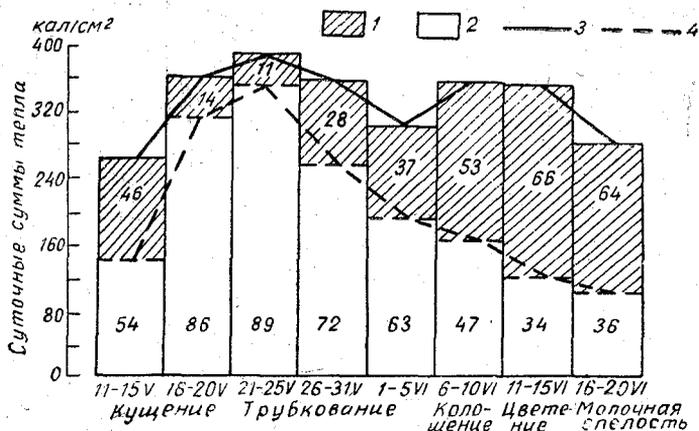


Рис. 14. Изменение теплового баланса на поле с пшеницей в течение вегетационного периода:

1 —  $P$ ; 2 —  $L E$ ; 3 — средние суточные суммы  $R$ ; 4 — средние суточные суммы  $L E$ .

меняются от фазы к фазе также вполне закономерно в соответствии с наличием критического периода у этой культуры во время репродуктивного развития (табл. 11).

Из табл. 11 можно сделать вывод о том, что расход воды на транспирацию у картофеля в начальный период жизни мал и резко увеличивается в репродуктивный период, превосходя в 1,5—2 раза испарение с поверхности почвы. При достаточной влажности почвы это вызывает рост суммарного испарения и соответствующее ему распределение элементов теплового баланса по фазам развития, а именно резкое увеличение затрат тепла на суммарное испарение в период формирования урожая. Некоторое снижение транспирации и затрат тепла на суммарное испарение для картофеля летней посадки в период после первого заморозка объясняется повреждением некоторых частей растения заморозком и частичным отмиранием ботвы. Поток тепла в почву как при весенней посадке, так и при летней в течение вегетационного периода уменьшается мало. Некоторое уменьшение потока тепла в почву к концу

Таблица 11

Суточные суммы составляющих теплового баланса (в % от  $R$ ), транспирации  $E_T$  и испарения с поверхности почвы (в % от суммарного испарения  $E$ ) на картофельном поле в среднем по периодам вегетации

Элементы теплового баланса	Весенняя посадка			Летняя посадка			
	6—14/IV, от всходов до начала накопления клубней	20/V—20/VI, накопление вегетативной массы и накопление урожая клубней	28—30/VI, продолжение накопления клубней и прекращение прироста вегетативной массы	11—16/VII, от посадки до всходов	21/VII—16/VIII, от всходов до начала накопления клубней, рост вегетативной массы	30/VIII—25/IX, продолжение накопления вегетативной массы и накопление урожая клубней	8—15/X, от заморозка до выкопки картофеля.
$\frac{P}{R}$ %	48	4	—16	42	18	—4	16
$\frac{LE}{R}$ %	36	79	107	37	66	88	67
$\frac{B}{R}$ %	16	17	9	21	16	16	17
$\frac{E_T}{E}$ %	39	42	68	5	12	63	54
$\frac{E_{II}}{E}$ %	61	58	32	95	88	37	46

вегетации связано с уменьшением градиентов температуры почвы вследствие значительного затенения ее поверхности в связи с ростом зеленой массы растений. Аналогичные результаты получаются и для других пропашных культур, например, для хлопчатника.

На соотношение элементов теплового баланса большое влияние оказывает густота растений. При густом травостое во все периоды вегетации затраты тепла увеличиваются на испарение и соответственно уменьшаются на турбулентный теплообмен с атмосферой. Транспирация при густом травостое в несколько раз превосходит испарение с поверхности почвы. При недостаточной влажности почвы соотношение между элементами теплового баланса меняется в зависимости от степени увлажнения почвы. В этом случае затраты тепла на испарение даже в критические периоды могут существенно уменьшиться и большая доля радиационного тепла пойдет на нагревание почвы и прилегающих слоев воздуха. При этом в растительном покрове часто возникают сверхadiaбатические градиенты температуры.

Особенности фитолимата сельскохозяйственных культур наиболее четко проявляются при безоблачной и малооблачной погоде. При переменной облачности и в пасмурные дни микроклиматические особенности внутри растительного покрова почти не проявляются вследствие малых градиентов метеорологических элементов.

#### § 4. Температура и влажность воздуха в травостое

Солнечная радиация, поглощенная листьями, только частично участвует в фотосинтезе. Основная ее часть расходуется на теплообмен с окружающим воздухом, транспирацию и изменение температурного режима растений. Поэтому температура поверхности листьев, помимо интенсивности притока солнечной радиации, в большой мере зависит и от других условий, а именно от скорости ветра, увеличивающего транспирацию и турбулентный теплообмен листьев с атмосферой, от влажности почвы и воздуха, регулирующих транспирацию, и т. д. В свою очередь, температура растений оказывает влияние на все эти процессы.

В настоящее время еще отсутствуют массовые наблюдения за температурой растений. Это связано с значительными методическими трудностями, возникающими при измерении температуры поверхности листа. В основном для этой цели используются некоторые виды термоэлектрических термометров, в частности, «термопауки».

Результаты этих наблюдений позволяют сделать некоторые предварительные заключения. Например, исследования Ф. Ф. Давитая, Ю. С. Мельника и др., проводивших наблюдения с помощью термопауков, показали, что между температурой поверхности листьев и температурой окружающего воздуха наблюдается существенное различие, которое зависит от ориентации листьев относительно солнца, влажности почвы, облачности, скорости ветра. Величина разности  $\Delta t = t_{\text{раст}} - t_{\text{возд}}$  имеет четко выраженный суточный ход. Как видно из рис. 15, наиболее существенные различия температуры воздуха и листьев имеют место при прямой солнечной радиации, и наоборот, в пасмурную погоду они невелики. Величина  $\Delta t$  в течение суток меняется по знаку. В дневные часы  $\Delta t$  существенно колеблется в зависимости от ориентации листьев относительно солнечных лучей. При перпендикулярном падении лучей  $\Delta t$  заметно возрастает, а при наклонном уменьшается в связи с увеличением альбедо растительного покрова. В дневные часы разность температуры листьев и окружающего воздуха часто уменьшается в результате увеличения скорости ветра.

Н. Г. Горышина установила зависимость разности температуры листьев винограда и воздуха при безоблачном небе от скорости ветра при сравнительно высокой влажности почвы (30/VIII и 2/IX 1958 г. Павловск). Эта зависимость имеет следующий вид:

Скорость ветра, м/сек . . . . .	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Разность температуры листьев и воздуха, °С . . . . .	6,4	5,8	5,2	4,7	4,1	3,6

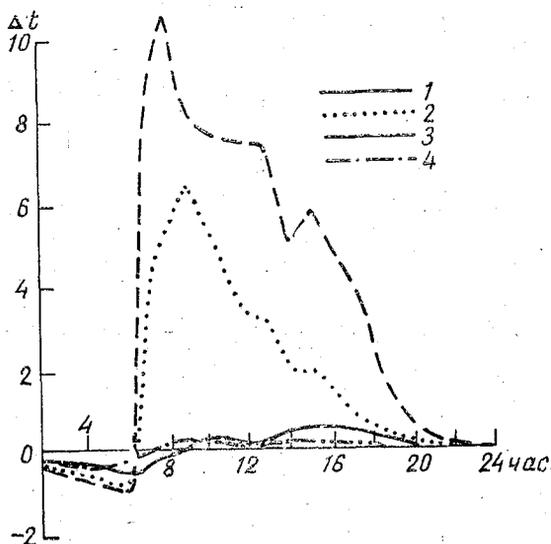


Рис. 15. Суточный ход разности температуры листьев и воздуха:

1 — солнечные лучи перпендикулярны к листу; 2 — они же параллельны листу; 3 и 4 — лист затемнен (Бакуриани, VIII, 1961 г.).

Из сказанного ранее следует, что при пасмурном небе и безветренной погоде температура воздуха внутри растительного покрова в достаточной мере близка к температуре листьев и может являться ее количественной характеристикой.

Вертикальное распределение температуры воздуха внутри растительного покрова зависит от степени его развития и в той или иной мере отличается от профиля температуры воздуха над оголенной почвой. При редком травостое характер распределения температуры по вертикали мало отличается от распределения температуры над полями без растительного покрова, т. е. максимум температуры днем и минимум ночью наблюдаются у поверхности почвы. В период, когда растения достигают наибольшего развития (фазы колошения, цветения, молочная спелость), максимум и минимум температуры смещаются вверх, до высоты наиболее густой части растительного покрова. Затем по мере усыхания листьев и стеблей экстремальные значения температуры наблюдаются бли-

же к почве и после уборки урожая достигают ее поверхности (рис. 16).

Ночью растительный покров предохраняет поверхность почвы от сильного охлаждения. Он излучает длинноволновую радиацию, в результате чего охлаждается и способствует понижению температуры окружающего его воздуха.

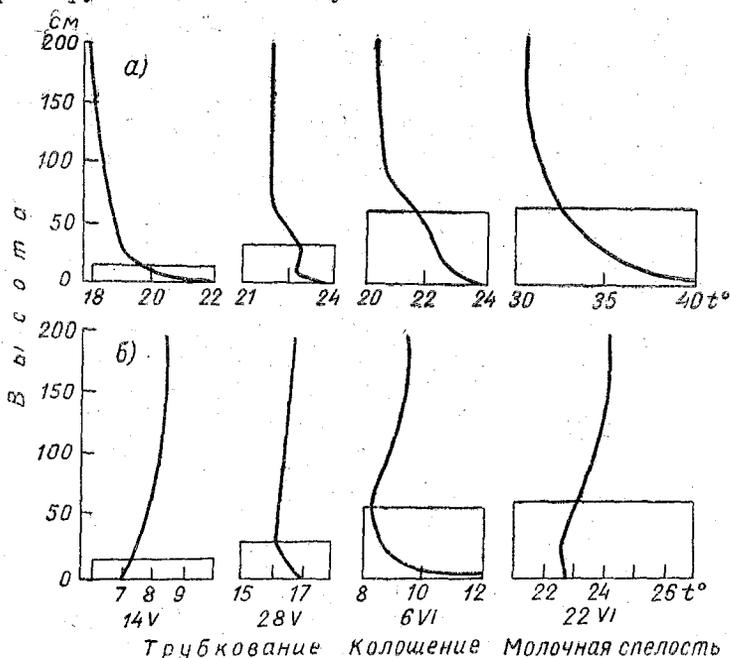


Рис. 16. Температура воздуха на поле с ячменем:  
а — день; б — ночь. Верхняя граница прямоугольников показывает среднюю высоту растений в различные фазы развития.

Наиболее сильно растительный покров влияет на характер вертикального распределения температуры при сомкнутом травостое, препятствующем опусканию холодного воздуха вниз до поверхности почвы. В этом случае минимальная температура воздуха ночью даже в период созревания растений находится на поверхности наиболее густой части травостоя. Это характерно для растений с широкими листьями (хлопчатник, кукуруза). На полях со злаковыми культурами ночной минимум и дневной максимум температуры часто все же наблюдается у поверхности почвы.

Следовательно, вертикальные профили температуры в растительном покрове существенно меняются в течение суток (рис. 16). Вид кривой изменения температуры с высотой внутри раститель-

ного покрова в значительной мере зависит от степени водоснабжения растений. При недостаточном обеспечении растений влагой транспирация уменьшается, что вызывает повышение температуры растений и может вызвать их перегрев. По данным Г. В. Белухиной, в дни с суховеями разность температуры в психрометрической будке и у верхнего края растений (пшеница) меняется под влиянием суточного хода транспирации довольно сильно (рис. 17).

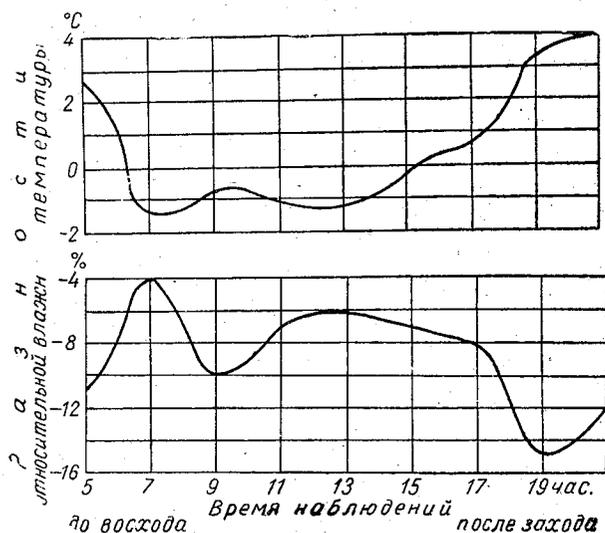


Рис. 17. Суточный ход разностей температуры и относительной влажности в метеорологической будке и у верхнего края растений. Ершов.

Как и при прочих условиях, днем воздух вблизи травостоя теплее, чем на уровне психрометрической будки, а ночью холоднее. Однако, кривая разности температуры имеет днем два максимума и два минимума. До восхода солнца, вследствие интенсивного излучения тепла с поверхности растений, воздух у поверхности растений холоднее, чем в психрометрической будке. В первые три часа после восхода солнца наблюдается более быстрый нагрев воздуха у поверхности травостоя, чем в вышележащих слоях. Этот прогрев обусловлен тем, что транспирация в первые утренние часы еще очень мала, поэтому потеря тепла на нее невелика, благодаря чему к 7 часам утра температура поверхности травостоя становится в среднем на 1—2° выше температуры на уровне 2 м. В поздние утренние часы потеря тепла на транспирацию увеличивается, нагрев воздуха у поверхности растений замедляется и его температура приближается к температуре на уровне 2 м.

В середине дня приток солнечной радиации к поверхности растений максимален, а транспирация уменьшается из-за того, что в суховейные дни у растений в эти часы от недостатка влаги наблюдается снижение тургора. Поэтому температура у поверхности растений становится на 1—2° выше, чем на уровне 2 м. После полудня приток солнечного тепла к поверхности травостоя уменьшается, что приводит сначала к медленному, а затем более быстрому падению температуры воздуха у поверхности травостоя. Около 16 часов температура в будке и у поверхности травостоя становится примерно одинаковой. Перед заходом солнца температура воздуха у поверхности травостоя оказывается всегда на несколько градусов (в среднем на 3—4°) ниже температуры в будке.

Следовательно, в суховейные дни температура воздуха на высоте растений в вечерние и ночные часы почти всегда ниже температуры воздуха в будке. В остальное время дня при солнечной сухой погоде температура у поверхности травостоя выше температуры в будке. Однако, среднесуточная температура на высоте растений будет довольно близкой к среднесуточной температуре в будке.

Влажность воздуха внутри растительного покрова в большой мере является результатом жизнедеятельности растений. Растительный покров представляет собой обширную испаряющую поверхность, вследствие чего воздух, непосредственно окружающий растение, всегда более богат водяным паром. В том случае, когда устьица открыты и нет существенного недостатка влаги, относительная влажность воздуха вблизи устьиц близка к 100%. При резком недостатке влаги в почве устьица обычно суживаются, испаряющая поверхность перемещается внутрь листа, и относительная влажность воздуха у поверхности листьев понижается. При удалении от поверхности растений влажность воздуха уменьшается. Многочисленные эксперименты показали, что при достаточном содержании влаги в почве относительная влажность воздуха внутри травостоя составляет в среднем 60—70%. При снижении относительной влажности до 40—50%, свидетельствующем об уменьшении транспирации в связи с ухудшением снабжения растений влагой, растительные организмы теряют тургор и имеют вялый вид.

Вертикальное распределение влажности в растительном покрове таково, что при выходе из него она уменьшается и чем дальше от растительного покрова, тем становится все меньшей. Эта закономерность наблюдается как днем, так и ночью (рис. 18). Характер вертикального распределения относительной влажности в приземном слое воздуха при наличии травостоя зависит от фазы развития растений. В ранних фазах (от кушения до колошения), пока запасы почвенной влаги еще значительны, относительная влаж-

ность воздуха на высоте растений почти всегда выше влажности на высоте 2 м. В последних фазах (восковая и полная спелость) транспирация уже невелика, вследствие чего относительная влажность на уровне колосьев в дневные часы мало отличается от влажности в будке.

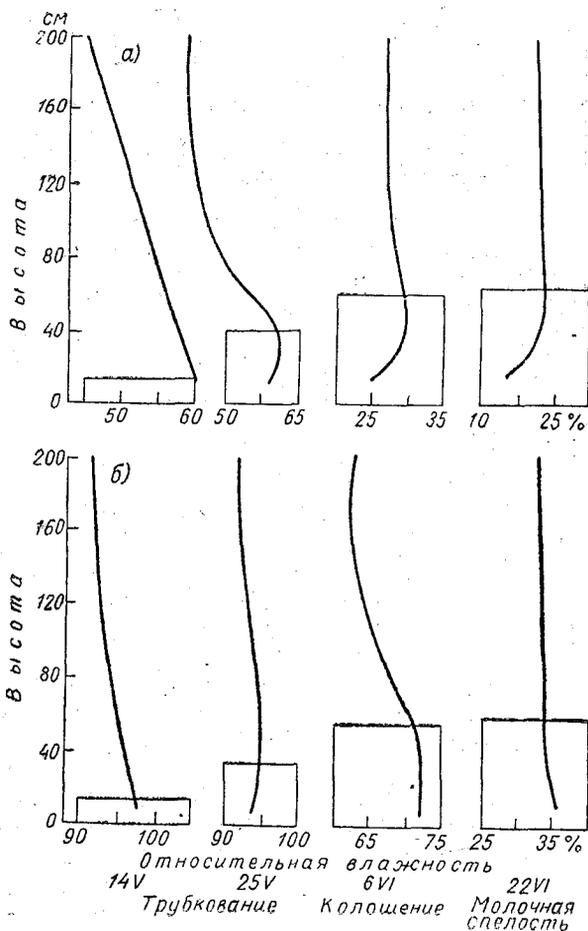


Рис. 18. Относительная влажность воздуха на поле с ячменем:  
а — день; б — ночь.

Поскольку относительная влажность вблизи травостоя находится в прямой зависимости от интенсивности транспирации, то суточный ход разности относительной влажности в будке и у верх-

него края растений зависит от влагосодержания почвы, определяющего характер деятельности устьичного аппарата. Поэтому в дни с суховеями (рис. 17) в полуденные часы, когда транспирация уменьшается в результате регулирующей особенности клеток устьиц, относительная влажность вблизи растительного покрова тоже заметно уменьшается и приближается по величине к относительной влажности воздуха на уровне психрометрической будки.

## § 5. Влияние растительного покрова на температуру почвы

Растительный покров оказывает многостороннее влияние на температурный режим почвы.

В дневные часы, затеняя почву от притока коротковолновой радиации, растительный покров способствует некоторому понижению температуры почвы. Ночью он задерживает длинноволновую радиацию, излучаемую земной поверхностью, и тем несколько повышает ее температуру. Высушивая почву в процессе транспирации, растительность уменьшает ее теплоемкость. Кроме того, растения расходуют значительное количество энергии на биологические процессы, вследствие чего количество тепла, поступающего к почве, уменьшается. Наконец растительный покров затрудняет перемешивание воздуха в приземном слое, уменьшая тем самым теплообмен почвы и травостоя с воздухом. В результате такого сложного влияния растительного покрова на температурный режим почвы, днем температура почвы, покрытой растительностью, заметно ниже, чем на участке, лишенном покрова. Ночью, наоборот, температура почвы под растительным покровом выше, чем оголенной.

Воздействие растений на температурный режим почвы зависит от особенностей самих растений, главным образом от густоты травостоя. Густая трава летом резко понижает температуру почвы. По данным П. И. Колоскова, среднесуточная температура почвы на глубине 10 см, при весе сухой массы 10 г на 1 м<sup>2</sup> была равна 24,2°; при весе 90 г на 1 м<sup>2</sup> 22,4°; при весе 510 г на 1 м<sup>2</sup> 17,6°. Однако почва, покрытая сухой редкой травой, в теплое время года часто бывает теплее оголенной в результате свободного проникновения коротковолновой радиации к почве и одновременного уменьшения турбулентного теплообмена с воздухом. Различные сельскохозяйственные культуры, обладая разной зеленой массой, в разной мере меняют температурный режим почвы. Для примера приведем данные, полученные А. М. Шульгиным в июле 1939 г. (табл. 12).

Температура почвы на глубине 3 см под сельскохозяйственными культурами значительно ниже, чем под паром. При этом температуры почвы под озимой пшеницей (высота 120 см) и кукурузой, имеющей большую зеленую массу и высоту растений 208 см, близки между собой. Под посевами проса (широкорядный посев

Таблица 12

Температура почвы на глубине 3 см под разными сельскохозяйственными культурами в 13 час. Нальчик

Числа июля 1939 г.	Пар	Озимая пшеница	Кукуруза	Просо
2	36,0	26,0	28,5	32,5
3	32,0	25,0	25,5	31,0
5	38,0	25,0	26,5	33,5
7	26,5	21,0	21,0	22,5
9	28,0	23,0	22,0	24,0
С е р н я (после уборки)				
14	38,0	32,0	25,5	30,0
15	29,0	26,0	22,5	24,5
16	35,0	28,4	24,0	27,0

с междурядьем 30 см и высотой растений 110 см) температура почвы значительно выше, чем под кукурузой и озимой пшеницей. Еще больше охлаждает почву летом лесная растительность. Степень влияния леса на температуру почвы зависит от сомкнутости леса и высоты деревьев (табл. 13).

Таблица 13

Зависимость изменения температуры почвы от возраста деревьев

Место наблюдений	Глубина, см			
	5	10	20	30
Открытая безлесная площадь . . . . .	19,6	18,0	16,8	16,1
Лес 33 лет. Сомкнутость 1,0 . . . . .	12,6	12,3	11,9	10,0
Лес 65 лет. Сомкнутость 0,9 . . . . .	16,6	16,0	14,8	14,0
Лес 150 лет. Сомкнутость 0,8 . . . . .	17,9	16,9	15,6	14,7
Лес 150 лет. Сомкнутость 0,8, второй ярус еловый густой . . . . .	11,6	11,3	11,2	10,4

Данные табл. 13 свидетельствуют о большой роли растительного покрова в температурном режиме почв.

### § 6. Влияние обработки почвы и способов агротехники на метеорологический режим приземного слоя воздуха

Помимо комплекса метеорологических элементов рост и развитие растений в большой мере определяются теми условиями, которые для них создает человек путем обработки почвы и применения агротехнических мероприятий. Например, одна и та же сумма осадков при разных способах обработки может создать различный

режим увлажнения почвы. Обработка почвы, её рыхление проводится с целью борьбы с засоренностью и для поддержания в почве комковатой структуры, улучшающей аэрацию и облегчающей распространение корневой системы. При различных способах обработки почвы меняется степень ее увлажнения и в связи с этим условия температуры и влажности, в которых живет растение. В то же время на высоте 2 м изменений метеорологических условий почти не наблюдается.

Вспашка почвы меняет составляющие теплового баланса приземного слоя воздуха. При часто применяемой отвальной вспашке более влажная почва нижних горизонтов оказывается на поверхности, в результате чего увеличивается испарение и уменьшается затрата тепла деятельной поверхностью на турбулентный теплообмен с атмосферой. В последующие дни почва просыхает и затрата тепла на испарение резко уменьшается, почва заметно прогревается и соответственно повышается температура прилегающих к ней слоев воздуха. Влажность почвы на вспаханном участке может быть даже несколько меньше, чем на необработанном поле, так как в первые дни после вспашки много влаги расходуется на испарение.

Степень прогрева почвы на вспаханном участке в период вегетации растений зависит от влажности почвы и структуры травостоя. При невысоком травостое и небольших запасах влаги в почве температура поверхности и верхних слоев почвы после обработки пропашных культур может повыситься на 3—4°, а иногда па 5°. Такой прогрев почвы в засушливую погоду может быть вредным для растений, особенно в период клубнеобразования картофеля. Однако, при высокой ботве и больших запасах влаги в почве прогрев ее после обработки заметно меньше и температура почвы и прилегающих слоев воздуха повышается только на 1—2°. Соотношения между затратами тепла на испарение, нагревание почвы и воздуха до и после обработки (рыхления) почвы на картофельном поле в Коломне 8—10/VII 1955 г., полученные Ф. А. Муминовым, приведены в табл. 14.

Таблица 14

Затраты тепла до и после обработки почвы в процентах от величины радиационного баланса. Коломна, 8—10/VII 1955 г.

Затраты тепла	До обработки, 7/VII	Обработка, 8/VII	После обработки, 10/VII
На испарение . . . . .	44	54	41
На нагревание почвы . . . . .	31	44	33
На нагревание воздуха . . . . .	25	2	26

Примечание. Осадки и поливы: 6/VII — 3,7 мм; 10/VII — 9 мм.

Перед обработкой почвы на испарение шло 44% тепла, на нагревание почвы 31% и на турбулентный теплообмен с атмосферой 25%. В дни обработки, когда более влажная почва нижних слоев оказалась на поверхности, испарение увеличилось и затраты тепла на испарение возросли до 54% за счет уменьшения затрат тепла на турбулентный обмен с атмосферой. Осадки, выпавшие 10/VII, увлажнили почву, поэтому затраты тепла на испарение увеличились, а на нагрев почвы уменьшились. В результате восстановилось соотношение между элементами теплового баланса, имевшее место до обработки почвы. Изменение теплового баланса отражается на температуре воздуха вблизи поверхности почвы и на глубинах 5 и 10 см.

В первый день обработки почвы из-за интенсивного испарения разность температуры поверхности почвы и воздуха на высоте 2 м несколько уменьшилась. На второй день испарение с подсохшей почвы уменьшилось и резко увеличилась температура ее поверхности, а в первый день после обработки это повышение температуры распространилось на слой 10 см.

Разные методы обработки почвы дают различное изменение температуры почвы и воздуха. Например, при безотвальной вспашке, когда верхний слой почвы рыхлится без переворачивания больших изменений теплового баланса деятельной поверхности не наблюдается.

Различия в температурном режиме почв, создаваемые растениями, обычно усиливаются в зависимости от агротехнических приемов, используемых на полях (табл. 15).

Таблица 15

Температура на глубине узла кущения (3 см) под посевами озимой пшеницы с разной агротехникой и на пару (13 часов, июнь, 1939 г. Нальчик), °С

Даты наблюдений	Сплошной посев	Ширококорядный посев 70×3 см	Ширококорядный посев 70×12 см	Пар
13/VI	17,5	17,7	21,0	22,3
15/VI	24,0	23,0	29,0	32,5
28/VI	25,5	26,0	32,5	33,0

Как видно из табл. 15, применением всевозможных агротехнических приемов и способов обработки почвы можно создавать определенные фитоклиматические особенности приземного слоя воздуха, изменяя их в направлении, нужном для сельскохозяйственного производства.

Существенного изменения теплового режима почвы можно достичь и при мульчировании, которое состоит в покрытии ее поверх-

ности тонким слоем красок, бумажных или пленочных покрытий. При этом преследуется цель изменить в основном отражательную и в меньшей степени излучательную способности поверхности почвы. При использовании черных красителей (угольная пыль, черная краска) несколько возрастает излучательная способность поверхности почвы, что приводит к ее охлаждению за счет длинноволнового излучения. Одновременно альbedo почвы уменьшается на 10—15%, что вызывает увеличение поглощенной солнечной радиации, радиационного баланса, и способствует нагреванию почвы. Исследования Н. Н. Банасевича показали, что температура почвы в Ленинградской области в результате мульчирования днем увеличивается на 8—10°. При этом несколько возрастает ее излучение. Кроме того, растет расход тепла на испарение и турбулентную теплоотдачу. Следовательно, в данном случае мульчирование способствует улучшению теплового режима не только почвы, но и всего слоя воздуха, в котором обитают растения.

Белое покрытие (бумага, опилки, мел), наоборот, увеличивает альbedo и уменьшает длинноволновое излучение из-за понижения температуры почвы, снижает расходы тепла на испарение и турбулентную теплоотдачу. Эти процессы, в свою очередь, вызывают дальнейшее понижение температуры слоя воздуха среди растений. Таким образом, белая окраска может служить средством для снижения избыточного нагревания в жарких районах. По данным Н. Н. Банасевича, при покрытии почвы мелом ее температура в дневные часы понижается в условиях Ленинградской области на 3—4°.

## § 7. Фитоклимат орошаемых полей

Фитоклимат полей существенно меняется при их орошении. Увлажнение почвы изменяет тепловой баланс поля и вертикальное распределение температуры и влажности воздуха тем больше, чем значительнее норма орошения и чем чаще производятся поливы. Поэтому естественно, что фитоклимат орошаемых полей сильно зависит от режима орошения. Периодически орошаемые поля (хлопчатник) и поля с постоянным затоплением характеризуются различными фитоклиматическими особенностями. Наибольшие изменения метеоэлементов при орошении наблюдаются на полях с постоянным затоплением. Влияние орошения проявляется как в изменении поглощения коротковолновой солнечной радиации, так и в длинноволновом балансе. Как известно, при орошении поля суммарная радиация фактически не меняется. Отраженная радиация в течение вегетационного периода меняется различно в зависимости от фазы развития. В результате изменения альbedo растений, например для риса от 12% — в фазу кущения до 20% — в фазе восковой спелости, поглощенная радиация в первые фазы

развития на орошенном участке заметно выше, чем на неорошенном, где альbedo больше, и составляет 20—22%, практически не меняясь в течение летнего периода. В период созревания эти различия исчезают. Различия же в поглощении коротковолновой радиации в целом невелики и не превышают в полуденные часы  $0,05 \text{ кал/см}^2 \text{ мин.}$

Баланс длинноволновой радиации на рассматриваемых полях различается более существенно, чем поглощение коротковолновой солнечной радиации. Из-за более низкой температуры деятельной поверхности на орошенном рисовом поле уменьшается излучение длинноволновой радиации и одновременно, вследствие повышения влажности воздуха, немного возрастает противозлучение атмосферы.

В полуденные часы разность эффективного излучения на неорошенном участке и рисовом поле, по данным М. Жапбасбаева, достигает  $0,29 \text{ кал/см}^2 \text{ мин.}$  Следовательно, при одинаковом поступлении суммарной солнечной радиации в дневные часы радиационный баланс на орошаемом рисовом поле больше, чем на неорошаемом участке. Разности этих величин около полудня могут достигать  $0,34 \text{ кал/см}^2 \text{ мин.}$

В целом на радиационный баланс поля, орошаемого затоплением, влияют как свойства поливной воды, так и особенности растительного покрова. В начальных фазах развития растений, когда площадь, занимаемая растениями, невелика, основную роль в радиационном балансе играет наличие поливной воды в почве. В дальнейшем воздействие густого сомкнутого травостоя растений оказывает основное влияние на радиационный баланс деятельной поверхности.

Ночью радиационный баланс орошенного поля немного меньше, чем неорошенного участка, что является следствием более сильного ночного излучения деятельного слоя рисового поля в результате сравнительно более высокой его температуры. Большая часть радиационного тепла на орошаемом поле расходуется на испарение и транспирацию растений, что вызывает понижение температуры деятельной поверхности и прилегающего слоя воздуха. В связи с этим над орошенным полем часто, особенно в дневные часы, создается приземная инверсия, и турбулентный поток тепла направлен из воздуха к деятельной поверхности (имеет отрицательный знак). Отрицательный турбулентный поток тепла поддерживается за счет местной адвекции более нагретых воздушных масс, которая приводит к углублению инверсии температуры воздуха над рисовым полем. Максимальные отрицательные значения турбулентного потока тепла на орошенном поле в течение всего вегетационного периода приходится на послеполуденное время (13—

14 часов), когда величина радиационного баланса явно не обеспечивает затраты тепла на испарение.

Из рис. 19 следует, что в отдельные межфазные периоды затраты тепла на испарение с орошаемого поля могут значительно превышать величину радиационного баланса.

Вечером и ночью количество тепла, отдаваемое приводным слоем воздуха деятельной поверхности рисового поля, становится незначительным, вследствие ослабления ветра и появления над поверхностью окружающей территории устойчивой стратификации, являющейся результатом ночного выхолаживания приземного слоя воздуха. Поэтому турбулентное перемешивание становится незначительным. В среднем при переходе к фазе восковой спелости из-за резкого сокращения транспирации растений отрицательный турбулентный поток уменьшается.

Теплообмен в почве в условиях орошаемого поля имеет своеобразный характер в связи с наличием слоя поливной воды и густым

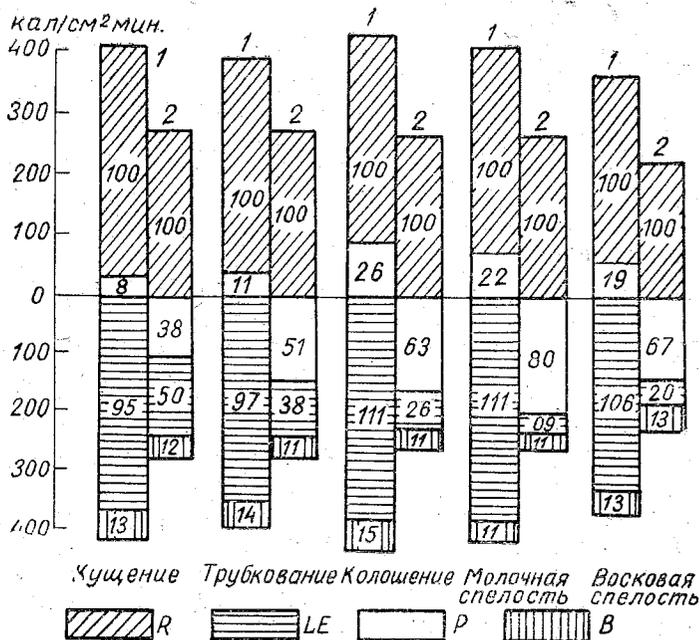


Рис. 19. Соотношение дневных сумм составляющих теплового баланса по фазам развития риса:

1 — рисовое поле; 2 — неорошаемый участок; R — радиационный баланс; LE — затраты тепла на испарение; P — турбулентный теплообмен между деятельной поверхностью и прилегающими слоями воздуха; B — теплообмен в почве.

травостоем. Слой поливной воды сильно сглаживает суточный ход температуры почвы на глубинах. Теплообмен в почве практически не меняется по фазам развития сельскохозяйственных культур. В среднем поток тепла в почву на орошенном участке за счет увеличения теплопроводности почвы несколько больше, чем на неорошенном, что улучшает температурные условия жизни корневой системы. Подробные экспериментальные исследования этих процессов проведены М. Жапбасбаевым.

В формировании режима температуры и влажности орошенного поля большую роль играет наличие увлажненного слоя почвы или слоя поливной воды, определяющих интенсивное испарение, которое приводит к образованию инверсии. Травостой растений вносит существенное изменение в температуру и влажность воздуха. Днем интенсивно транспирирующие растения всегда имеют температуру ниже температуры воздуха, что способствует охлаждению воздуха вблизи поверхности травостоя. Одновременно с этим повышается влажность воздуха. При рассмотрении вертикального распределения температуры приземного слоя воздуха при орошении отмечают наличие минимума температуры днем на поверхности растительного покрова. Охлаждающийся здесь воздух становится более плотным и опускается до поверхности поливной воды или увлажненной почвы. Поэтому в слое ниже поверхности листьев часто наблюдается изотермия. Ночью, наоборот, температура воздуха в слое ниже поверхности растений на 2—3° выше, чем на неорошаемом участке, хотя и здесь наблюдается инверсия. В результате амплитуды суточного хода температуры воздуха на орошенном участке меньше, чем на неорошенном, причем на орошенном участке амплитуда увеличивается с высотой, а на неорошенном уменьшается (табл. 16).

Таблица 16

Амплитуда суточного хода температуры воздуха в разные фазы развития риса

Участок	Высота, см		
	20	50	100
Ку щ е н и е			
Рисовое поле . . . . .	12,8	13,7	13,8
Неорошенный участок . . . . .	21,6	19,7	18,6
Т р у б к о в а н и е			
Рисовое поле . . . . .	12,9	14,0	13,8
Неорошенный участок . . . . .	20,3	18,7	17,7
В ы м е т ы в а н и е			
Рисовое поле . . . . .	13,4	13,5	14,1
Неорошенный участок . . . . .	19,8	18,1	17,1

Участок	Высота, см		
	20	50	100

Молочная спелость

Рисовое поле . . . . .	14,6	14,6	15,4
Неорошенный участок . . . . .	21,2	19,4	18,7

Восковая спелость

Рисовое поле . . . . .	16,4	16,4	17,0
Неорошенный участок . . . . .	24,3	22,7	20,6

Относительная влажность над орошаемым участком больше, чем над неорошаемым. Разности между ними могут составлять от 10 до 40%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений. Гидрометеиздат, Л., 1954.
2. Венцкевич Г. З. Агрометеорология. Гидрометеиздат, Л., 1958.
3. Вериго С. А. и Разумова Л. А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. Гидрометеиздат, Л., 1963.
4. Гольцберг И. А. Микроклимат и его значение в сельском хозяйстве. Гидрометеиздат, Л., 1957.
5. Руднев Г. В. Агрометеорология. Гидрометеиздат, Л., 1964.
6. Русий Н. П. Климат сельскохозяйственных полей. Гидрометеиздат, Л., 1955.
7. Сапожникова С. А. Микроклимат и местный климат. Гидрометеиздат, Л., 1956.
8. Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование. Гидрометеиздат, Л., 1967.
9. Шульгин И. А. Солнечная радиация и растение. Гидрометеиздат, Л., 1967.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Значение метеорологических условий в сельскохозяйственном производстве . . . . .	3
§ 1. Роль солнечной радиации в жизни растений . . . . .	3
§ 2. Роль тепла в жизни растений . . . . .	12
§ 3. Роль воды в жизни растений и их влагообеспеченность . . . . .	21
Глава II. Метеорологический режим среди растений. Фитоклимат . . . . .	54
§ 1. Понятие о фитоклимате . . . . .	54
§ 2. Радиационный режим травостоя . . . . .	56
§ 3. Тепловой баланс поля . . . . .	59
§ 4. Температура и влажность воздуха в травостое . . . . .	62
§ 5. Влияние растительного покрова на температуру почвы . . . . .	68
§ 6. Влияние обработки почвы и способов агротехники на метеорологический режим приземного слоя воздуха . . . . .	69
§ 7. Фитоклимат орошаемых полей . . . . .	72